

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



Grado en Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

**ENJAMBRES DE DRONES APLICADOS AL MAPEO DE
ÁREAS RURALES Y LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS**

Jaime Ferrándiz San José
Tutor: Juan Jesús Roldán Gómez
Ponente: Iván Cantador Gutiérrez

Junio 2021

ENJAMBRES DE DRONES APLICADOS AL MAPEO DE ÁREAS RURALES Y LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS

AUTOR: Jaime Ferrándiz San José

TUTOR: Juan Jesús Roldán Gómez

**Dpto. Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Junio de 2021**

Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño y creación en Unity de un entorno de simulación para un enjambre de drones que sobrevuelen un terreno realista y obtengan información útil para la asignación de riesgo de cara a la prevención de incendios mediante la toma de fotografías desde el aire que se deben fusionar en una única imagen compuesta y analizar en función de su densidad de vegetación y la inclinación del terreno.

Los drones siguen rutas de vuelo calculadas por la estación base, un ordenador remoto encargado de la obtención de puntos a recorrer por cada dron, la altura a la que deben sobrevolar cada punto para tomar fotografías adecuadas para la fusión de imágenes, la fusión de imágenes y el tratamiento visual de la composición final. Además, se establecen escalas de riesgo para el terreno en base a la densidad de vegetación y a la pendiente del terreno para generar mapas de riesgo que permitan identificar qué zonas pueden suponer un mayor peligro en caso de que un incendio ocurra.

En el trabajo se detallan los pasos seguidos para desarrollar del entorno de simulación y la funcionalidad necesaria para el control de movimiento de los drones, la toma y fusión de imágenes y el algoritmo utilizado para extraer la información relevante de la composición resultante del proceso de fusión de imágenes.

Por último, se valora si los objetivos definidos han sido satisfechos y se explican las posibles adiciones y modificaciones que se pueden hacer al entorno de simulación y a los métodos de análisis de riesgo para obtener información más completa para la prevención de incendios.

Palabras clave (castellano)

Enjambre de Drones, Simulación, Terreno, Vegetación, Pendiente, Riesgo, Prevención, Incendio, Fusión de Imágenes, Tratamiento de Imágenes, Agrupamiento.

Abstract (English)

This Bachelor Thesis consists of the design and creation in Unity of a simulation environment for a swarm of drones that fly over a realistic terrain and obtain useful information for assigning risk for fire prevention by taking aerial photographs meant to be merged into a single composite image and to be analyzed based on its density of vegetation and the slope of the terrain.

The drones follow flight routes calculated by the base station, a remote computer in charge of obtaining the points to be covered by each drone, the height at which they must fly over each point to take adequate photographs for image fusion, image fusion and the visual treatment of the final composition. In addition, risk scales are established for the terrain based on the density of vegetation and the slope of the terrain in order to generate risk maps that help in identifying which areas may pose a greater danger in the event of a fire occurring.

This Thesis details the steps followed to develop the simulation environment and the functionality necessary in order to control the movement of drones, the taking and merging of images and the algorithm used to extract the relevant information from the composite image resulting from the image fusion process.

Finally, it is evaluated whether the defined objectives have been satisfied and the possible additions and modifications that can be made to the simulation environment and to the risk analysis methods to obtain more complete information for fire prevention are explained.

Keywords (inglés)

Swarm of Drones, Simulation, Terrain, Vegetation, Slope, Risk, Prevention, Fire, Image Fusion, Image Processing, Clustering.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Juan Jesús Roldán Gómez la ayuda y el tiempo dedicados para poder sacar adelante este trabajo. Ha estado disponible en todo momento y me ha resuelto todas las dudas que he ido encontrando a lo largo de la realización del trabajo.

Me gustaría agradecer también por el apoyo a mi familia, especialmente a mis padres, que me han animado cuando en los momentos en los que veía más difícil el futuro.

Por último, a mi mejor amigo, Tomás. Sin él no sería la persona que soy hoy.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Estado actual de prevención	1
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Organización de la memoria.....	3
2	Estado del arte	5
2.1	Técnicas actuales para la prevención de incendios	5
2.2	Uso de tecnología para el mapeo de zonas con vegetación	5
3	Diseño.....	7
3.1	Entorno de simulación.....	7
3.1.1	Terreno.....	7
3.2	Drones.....	9
3.2.1	Punto de partida	9
3.2.2	Número de drones y características	10
3.2.3	Toma de imágenes	10
3.3	Estación base	10
3.3.1	Rutas de los drones	10
3.3.2	Altura de los drones.....	11
3.3.3	Cálculo de pendiente del terreno	12
3.3.4	Fusión y tratado de imágenes	12
3.3.5	Generación de imágenes adicionales de asistencia para la prevención de incendios.....	13
4	Desarrollo	15
4.1	Drones.....	15
4.2	Estación base	16
4.2.1	Control y fusión de imágenes	16
4.2.2	Planificador.....	17
4.2.3	Tratamiento de imágenes y obtención de resultados	18
4.2.3.1	Creación de mapas de riesgo para la prevención de incendios.....	19
5	Integración, pruebas y resultados	23
5.1	Algoritmos de ruta	23
5.2	Fotografías de los drones.....	23
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	33
6.1	Conclusiones.....	33
6.2	Trabajo futuro	35
	Referencias	37
	Glosario	- 1 -

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 3-1: TERRENO PROTOTIPO DE LA SIERRA DE GUADARRAMA	7
FIGURA 3-2: TERRENO BASE DEL PROYECTO	8
FIGURA 3-3: TERRENO TRAS LA APLICACIÓN DE TEXTURAS	8
FIGURA 3-4: TERRENO FINAL PARA LA SIMULACIÓN	9
FIGURA 3-5: RUTA DEL ALGORITMO ESPIRAL	11
FIGURA 3-6: RUTA DEL ALGORITMO ZIGZAG	11
FIGURA 3-7: COMPARACIÓN DE LA CANTIDAD DE TERRENO OBSERVADO POR UNA MISMA CÁMARA DEPENDIENDO DEL RELIEVE	12
FIGURA 4-1: PROCESO DE DECISIÓN DE LOS DRONES	15
FIGURA 4-2: PROCESO DEL TRATAMIENTO DE LA IMAGEN AÉREA.....	18
FIGURA 5-1: FUSIÓN DE LAS IMÁGENES DE UNA SECCIÓN	23
FIGURA 5-2: FUSIÓN DE LAS CUATRO REGIONES POR SEPARADO	24
FIGURA 5-3: FUSIÓN COMPLETA DEL ESCENARIO	25
FIGURA 5-4: IMAGEN PROCESADA TRAS ELIMINAR LAS ZONAS PRINCIPALMENTE AZULES.....	26
FIGURA 5-5: AGRUPAMIENTOS FALLIDOS PARA 3 Y 4 GRUPOS	26
FIGURA 5-6: IMAGEN RESULTANTE DEL PROCESO DE AGRUPAMIENTO K-MEDIAS PARA 2 GRUPOS	27
FIGURA 5-7: EVOLUCIÓN DE LA IMAGEN TRAS EL PROCESO DE CONVERSIÓN A ESCALA DE GRISES, CERRADO Y APERTURA DE LA IMAGEN	28
FIGURA 5-8: IMAGEN FINAL DE DENSIDAD DE VEGETACIÓN.....	29
FIGURA 5-9: MAPA DE CALOR DE DENSIDAD DE VEGETACIÓN	29
FIGURA 5-10: MAPA DE CALOR DE LA PENDIENTE DEL TERRENO.....	30
FIGURA 5-11: MAPA DE RIESGO POR DENSIDAD DE VEGETACIÓN.....	31
FIGURA 5-12: MAPA DE RIESGO POR PENDIENTE DEL TERRENO	32
FIGURA 5-13: MAPA DE RIESGO PONDERADO	33

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: NIVELES DE RIESGO POR GRADOS DE INCLINACIÓN DEL TERRENO	20
TABLA 2: NIVELES DE RIESGO POR PORCENTAJE DE VEGETACIÓN.....	20
TABLA 3: NIVELES DE RIESGO SEGÚN EL VALOR OBTENIDO POR LA FÓRMULA DE RIESGO PONDERADA	21
TABLA 4: RESULTADOS DE TIEMPO Y DISTANCIA RECORRIDA PARA CADA ALGORITMO DE RUTA..	23

1 Introducción

1.1 Motivación

Los incendios suponen desde hace décadas una amenaza constante para el medioambiente, los ecosistemas, los bienes materiales y las vidas humanas. Estas catástrofes ocurren en todas partes del mundo año tras año, causando daños a la vegetación, a la fauna y al terreno, que en los mejores casos tardan años en recuperarse. Son muy frecuentes noticias que informan de cómo zonas rurales arden durante días hasta que se consigue extinguir el fuego, siendo en muchos casos sólo posible gracias a la combinación de grandes esfuerzos humanos y mejoras de la situación del entorno fuera del control humano, como cambios en el viento, precipitaciones o el agotamiento de los combustibles naturales.

No es necesario retroceder mucho en el tiempo para encontrar algunos de estos grandes incendios, por ejemplo, los grandes incendios australianos de 2019 y 2020, los habituales fuegos de California en la costa oeste de Estados Unidos o la temporada de incendios de 2017 en Chile, que supuso la pérdida de más del 3% de la superficie forestal del país (WWF España, s.f.).

En cuanto a incendios más cercanos, la Península Ibérica no es extraña al fuego. Se estima que Portugal pierde alrededor del 3% de su superficie forestal de forma anual. En España, los datos de la pasada década revelan que cada año se quema un 0,342% de la superficie forestal, es decir, más de 95.000 hectáreas (WWF España, s.f.) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

Las causas de estos incendios son variadas: eventos naturales como rayos, negligencias y accidentes, incendios provocados, etc. Independientemente del origen del fuego, una vez este ha empezado su expansión total dependerá del terreno, la densidad de vegetación y el estado de esta, de las condiciones climatológicas y del tiempo de respuesta y acción humana para extinguir el incendio (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019).

Las acciones necesarias para combatir un incendio son las siguientes: prevención, detección y extinción. La prevención consiste en evitar que ocurran incendios y minimizar sus consecuencias. La detección es el proceso de supervisión regular de las zonas que puedan sufrir incendios, prestando especial atención a aquellas áreas que se consideren como más peligrosas, ya que el tiempo que transcurre entre el inicio y la identificación de un fuego es determinante en la magnitud del terreno quemado y en la dificultad para apagarlo. Por último, el trabajo de extinción abarca todo el esfuerzo necesario desde que se detecta el fuego hasta que todo el terreno afectado queda completamente controlado (Vélez Muñoz, 2009) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

De forma anecdótica, algunos bomberos dicen que los incendios que ocurren en verano deberían ser extinguidos en invierno, refiriéndose a la importancia de las labores de prevención (Roldán-Gómez, González-Gironda, & Barrientos, 2021). Por ello, el objetivo de este trabajo es ofrecer una mejora al ámbito de prevención para facilitar el mapeo del terreno y obtener información útil sobre este para poder asignar riesgos y valorar qué zonas requieren modificaciones o una mayor atención ante la posibilidad de un incendio.

1.2 Estado actual de prevención

Para evitar la ocurrencia de incendios y reducir las consecuencias de estos, el trabajo de prevención se suele centrar en dos ramas: prevención de las causas y prevención de combustibles.

La prevención de las causas es muy importante para reducir el número de incendios totales que ocurren. Entre 2006 y 2015, en España se estima que el 28% de los incendios tuvieron

como origen accidentes o negligencias, mientras que el 7% son de origen natural y el 12% son por causas desconocidas (Vélez Muñoz, 2009). El trabajo de esta rama consiste en la concienciación del público general mediante campañas informativas y educativas para reducir los accidentes y acciones negligentes en zonas donde los incendios pueden ser más perjudiciales y peligrosos.

La prevención de combustibles engloba las actividades de supervisión del terreno, obtención de información relevante, análisis de los datos y actuación sobre la vegetación y el terreno para frenar la expansión de fuegos y reducir sus posibilidades de aparición. Tras las tareas de extinción, la supervisión y prevención de incendios son los trabajos que más esfuerzo humano requieren.

Según profesionales de este campo, entre los que se encuentran bomberos, bomberos forestales, pilotos, agentes forestales, técnicos y voluntarios, el conjunto de tareas de prevención y supervisión son muy importantes para la lucha contra incendios en el entorno forestal y rural. De acuerdo con su opinión, la prevención de causas es tan importante como la de combustibles. Dentro de los trabajos de prevención y supervisión que abarca este trabajo, destacan las tareas de administración del terreno y preparación de la vegetación, así como una adecuada supervisión del terreno. Respecto a estas labores, los profesionales consideran que problemas como la falta de medios para preparar la vegetación, falta de información para una preparación eficiente del terreno y una falta de recursos humanos y materiales son los principales aspectos que mejorar en este campo (Roldán-Gómez, González-Gironda, & Barrientos, 2021).

La supervisión es un trabajo útil tanto para la prevención como para la detección de incendios. Es necesario recoger información relevante del terreno y su vegetación de forma regular para poder establecer zonas de riesgo y de acción, así como patrullar esas áreas más peligrosas para detectar incendios lo más pronto posible desde su ignición.

Centrando la atención en la prevención, los profesionales de este campo aportan información acerca del uso actual de la tecnología para llevar a cabo sus tareas y de su conformidad para aceptar la entrada de nuevas tecnologías para facilitar o mejorar las labores. La obtención de información necesaria para la preparación de la vegetación es el aspecto de la prevención de incendios para el cual los profesionales consideran más útil la introducción de la tecnología. Aproximadamente, un 60-70% opinan que la obtención de imágenes por satélite o mediante drones para esta labor sería útil o muy útil, mientras que alrededor del 20% de los encuestados se considera neutral y no se opone a su utilización. El uso de inteligencia artificial para predecir el riesgo de incendio no es tan aceptado como el de los casos anteriores: menos del 50% considera que esta técnica sea útil para la prevención de incendios, y alrededor de un tercio de los profesionales encuestados consideran su incorporación como muy poco o poco útil (Roldán-Gómez, González-Gironda, & Barrientos, 2021). Cabe mencionar que este rechazo a la inteligencia artificial en este aspecto puede estar en parte debido al ser una tecnología que cambia en gran medida la manera de trabajo o incluso amenaza ciertas posiciones de trabajo. La obtención de imágenes aéreas obtiene un mayor apoyo de los profesionales en parte porque facilita en gran medida el trabajo, ya que uno de los problemas para la obtención de información del terreno es la falta de recursos humanos para llevar a cabo dicha tarea.

El uso de drones para la obtención de imágenes aéreas de zonas rurales supone un incremento notable de la eficiencia del trabajo de prevención, que no sólo permite obtener información en menos tiempo y de manera más frecuente, pudiendo así actualizar los planes de acción en periodos de tiempo más breves o cuando se considere necesario, sino que además ofrece la posibilidad de conseguir información más precisa y mayor calidad que la obtenida a pie por agentes forestales.

1.3 Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo principal utilizar un enjambre de drones para mapear el relieve de una zona rural forestal y establecer el nivel de riesgo para cada punto del mapa en caso de incendio. Para ello, se ha de conseguir los siguientes puntos:

- El enjambre de drones necesita un entorno adecuado en el que se puedan desarrollar y probar algoritmos, por lo que se ha de crear un simulador de un entorno relevante.
- Es necesario crear un algoritmo de planificación de rutas que permita a cada dron saber los puntos que deben recorrer para cubrir el área deseada.
 - Se debe medir el tiempo que se tarda en completar las rutas para valorar si el tipo de dron elegido es adecuado para la tarea.
- Las imágenes tomadas por las cámaras de los drones deberán ser fusionadas mediante un algoritmo para obtener una imagen completa del escenario supervisado.
 - Las fotografías tomadas deben representar por cada píxel un área de 0,25x0.25 m o inferior.
- La imagen final ha de ser procesada para obtener una estimación de la densidad de vegetación por zonas que pueda ser analizada por profesionales forestales.
- Se deberá crear un mapa de riesgo de la zona observada en función de la densidad de vegetación y de la pendiente del terreno que sirva para identificar las zonas con mayor peligro en caso de incendio.

1.4 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Estado del arte
- Diseño
- Desarrollo
- Integración, pruebas y resultados
- Conclusiones y trabajo futuro

2 Estado del arte

La prevención de incendios engloba una serie de actividades cuyos objetivos principales son la reducción de la probabilidad de que se originen incendios y minimizar los efectos causados por el fuego. Como se ha mencionado previamente, estos objetivos se consiguen mediante dos vías distintas: estudiando las causas de los incendios y trabajando para reducir las acciones que llevan al apareamiento del fuego, y estudiando los materiales combustibles del terreno que pueden prender o facilitar la expansión de un incendio y actuando sobre ellos para frenar y contener la expansión de los incendios.

Este trabajo se centra en la asignación de riesgos a los combustibles (vegetación) del terreno para asistir a los equipos de prevención en la toma de decisiones necesarias para modificar el estado del terreno para reducir las consecuencias de los incendios. Por lo tanto, hay que estudiar qué técnicas se utilizan para llevar a cabo estas tareas y en qué medida se utilizan elementos tecnológicos para facilitar o realizar estas labores.

2.1 Técnicas actuales para la prevención de incendios

Mientras que para atacar las causas de los incendios estas se investigan, se crean programas de concienciación y educación para el público general y se crea normativa que limite el uso del fuego en zonas de riesgo, la prevención relativa a combustibles consiste en vigilar y estudiar el terreno para dificultar el desplazamiento del fuego cuando este se produce. Esto se consigue mediante la creación de cortafuegos o zonas de discontinuidad de vegetación que impidan el paso del fuego debido a la falta de combustible, la colocación de depósitos de agua destinados a la extinción para que el acceso a una fuente de agua pueda realizarse en el menor tiempo posible, y construyendo pistas forestales que permitan el acceso de vehículos y personal de mantenimiento de bosques y extinción de incendios a las zonas de interés para estas labores (Generalitat Valenciana, 2012). La vigilancia del terreno para decidir qué cambios debe sufrir el terreno y su vegetación es clave para reducir las consecuencias de un posible incendio.

Encuestas realizadas a profesionales involucrados en tareas de prevención, monitorización y extinción de incendios reflejan que estos valoran como una de las tareas más importantes la adecuada preparación de la vegetación del terreno (Roldán-Gómez, González-Gironda, & Barrientos, 2021). Para conseguir este objetivo es necesario tener una buena información del terreno y su vegetación, que puede cambiar debido a condiciones meteorológicas o cambios estacionales. De acuerdo con este motivo, los profesionales encuestados destacan la importancia de la monitorización del terreno, no sólo para la detección de incendios sino también para la obtención de la información del terreno. El mayor problema que esto supone es la cantidad de recursos humanos necesarios para mapear grandes áreas y mantener la información actualizada.

La solución propuesta para esta tarea es la obtención de esa información mediante imágenes aéreas tomadas por drones o por satélite, idea que resulta atractiva a la mayor parte de los encuestados.

2.2 Uso de tecnología para el mapeo de zonas con vegetación

El uso de tecnologías para la obtención de información útil para la planificación forestal ha aumentado considerablemente en las últimas décadas (Banu, Borlea, & Constantin, 2016). La recepción de estas tecnologías es mayormente positiva cuando la adopción de los nuevos instrumentos y técnicas apoyan el trabajo que los profesionales realizan y no cambian drásticamente sus métodos de trabajo o suponen ser reemplazados en su trabajo (Roldán-Gómez, González-Gironda, & Barrientos, 2021).

La información necesaria para conocer el estado de la vegetación y los factores que afectan al riesgo de incendio puede obtenerse mediante la utilización de satélites o drones. Por ejemplo, la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea proporciona imágenes de alta resolución del terreno tomadas mediante cámaras multispectrales montadas en dos satélites que se actualizan con una periodicidad de 5 días y aportan información global relevante para la gestión de zonas agrícolas y forestales (The European Space Agency, 2015) (Hojas-Gascon, y otros, 2015). Imágenes tomadas por estos satélites permiten, por ejemplo, crear mapas de vegetación de alta precisión de áreas forestales para la clasificación por especies (Bolyn, Adrien, Gaucher, Lejeune, & Bonnet, 2018).

Los drones ofrecen una serie de ventajas sobre los satélites para la obtención de información, destacando principalmente dos: es posible actualizar la información recogida por los drones con la frecuencia que se desee al no depender de la frecuencia fija de órbita de un satélite, y es posible tomar imágenes aéreas de mayor resolución que la ofrecida por los satélites mediante un proceso de toma y composición de imágenes (Valente, Sanz, Del Cerro, Barrientos, & de Frutos, 2012). Las imágenes aéreas tomadas por los drones aportan información útil para la detección de áreas problemáticas o de alto riesgo en caso de incendio, que ayuda a decidir qué zonas deben ser modificadas.

El uso de drones resulta muy atractivo para actividades agrícolas (Valente, Sari, Kooistra, Kramer, & Múcher, 2020) y forestales por la posibilidad de montar en ellos distintos instrumentos de medida más allá de cámaras convencionales, como por ejemplo sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Anders, Valente, Masselink, & Keesstra, 2019) o cámaras multispectrales (Zhang, Valente, Kooistra, Guo, & Wang, 2019). Además, el coste de un enjambre de drones es más reducido que el de un satélite, y su disponibilidad y capacidad de adaptación es mayor ya que, si se desea actualizar los instrumentos de medida que se quieren utilizar, el cambio se puede realizar fácilmente.

Los drones aéreos se clasifican en función de su uso, existiendo los de uso civil y los de uso militar. Dentro de los drones de uso civil se encuentran los drones de uso profesional, que están pensados para ser volados en exteriores, tienen un mayor rango de vuelo y cuentan con sistemas GPS para el desplazamiento de punto a punto. También se clasifican según el tipo de ala que tengan: fija o rotatoria. Los drones de ala fija suelen contar con una mayor autonomía de batería porque se aerodinámica, que les permite planear con facilidad, pero los drones de ala rotatoria tienen mayor versatilidad, pudiendo desplazarse en cualquier dirección y mantenerse en el aire sobre un punto del terreno (Adeva, 2021).

De acuerdo con estas características, un dron de ala rotatoria es ideal para el mapeo propuesto en este trabajo, pudiendo elegirse con la cantidad de rotores que se quiera, existiendo multirrotores de 3, 4, 6 y 8 motores. Con drones de este tipo es posible obtener información relevante de cualquier terreno mediante los sensores que se monten en el cuerpo de la nave, calculando previamente el tiempo de recorrido para no superar la autonomía de la batería

3 Diseño

En este capítulo se detallan los distintos componentes del proyecto, sus funciones y labores dentro de la simulación.

3.1 Entorno de simulación

Para poder desarrollar los algoritmos de vuelo, toma, fusión y tratado de imágenes es necesario contar con un entorno de simulación adecuado y realista que aporte resultados válidos.

El motor de videojuegos Unity es la herramienta ideal para albergar la simulación. Unity nos permite generar un terreno y modificarlo hasta tener un escenario adecuado para ser analizado. En este entorno es posible programar el enjambre de drones, simular su movimiento, tomar fotografías con cámaras simuladas de características reales desde los drones y exportar toda la información obtenida en el formato que se considere necesario.

3.1.1 Terreno

Se han valorado distintas opciones en cuanto al terreno a simular para la obtención de datos. Una primera opción para el terreno fue la representación exacta de relieve de alguna zona montañosa del territorio español, pero esto supuso algunos problemas. El primero de ellos fue que encontrar una sección de un tamaño adecuado (que no fuese ni demasiado pequeña ni tan grande que el tiempo de análisis fuese demasiado elevado) y con una variedad de relieve suficiente como para ver distintas situaciones en el terreno. Este problema podía sortearse encontrando un área mayor que el tamaño ideal buscado para el terreno final (ver Figura 3-1) y reduciendo el terreno más adelante dentro Unity. Esta solución presentaba otro problema, que es que, al reducir un terreno en tamaño, las pequeñas variaciones a lo largo de todo el terreno se acentúan demasiado, creando un terreno muy irregular y poco realista.

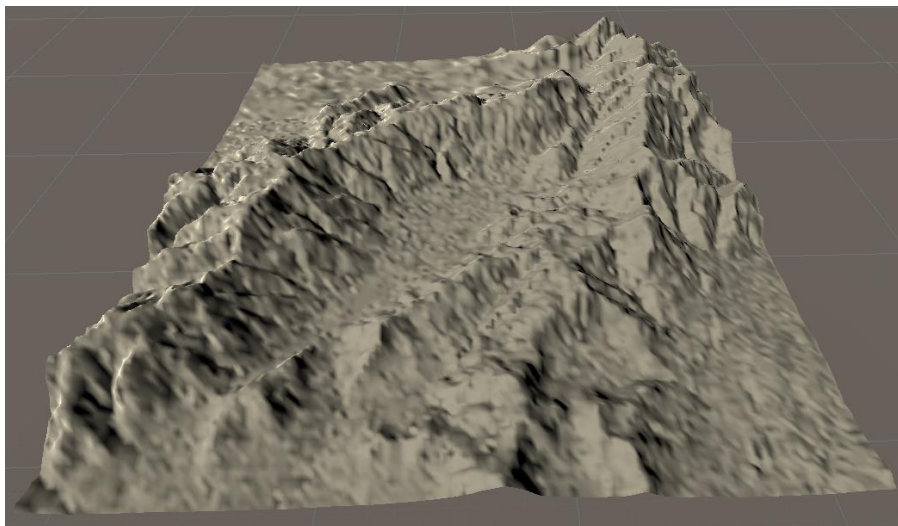


Figura 3-1: Terreno prototipo de la sierra de Guadarrama

Teniendo en cuenta estos inconvenientes, la decisión final fue la de tomar un área de 64 km² (6400 hectáreas) de la sierra de Guadarrama y reducirlo hasta obtener una sección de 9 km² (900 hectáreas). Esta reducción nos permite tener suficiente espacio como para simular distintas situaciones de relieve y vegetación y poder cubrir el terreno en una cantidad de tiempo razonable. Como el terreno fue reducido, para suavizar las irregularidades antes

mencionadas, se hizo un suavizado a mano mediante las herramientas de transformación de terrenos que Unity proporciona (Figura 3-2).

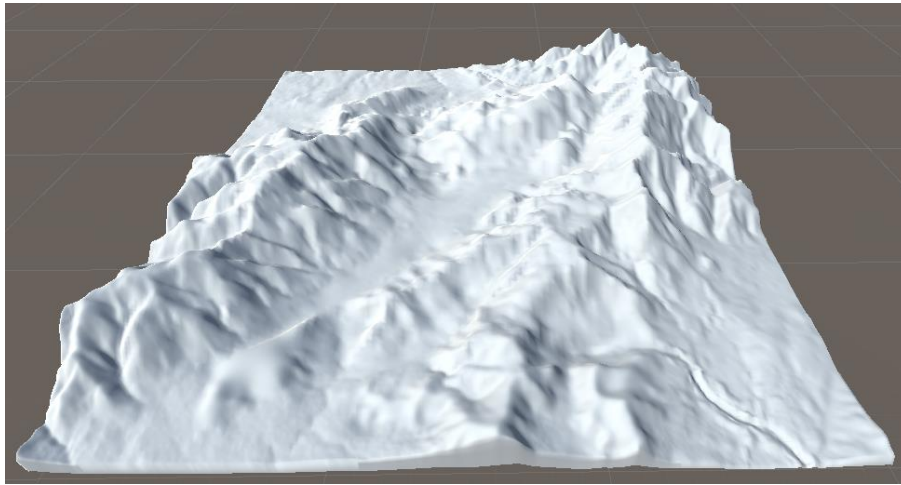


Figura 3-2: Terreno base del proyecto

Una vez establecido el terreno base sobre el que trabajar, el siguiente paso fue el de modificar ligeramente el relieve para incluir algún accidente geográfico adicional, como llanuras, depresiones para lagos o valles a través de los cuales puedan descender ríos. Incluir masas de agua en las zonas adecuadas se ha conseguido añadiendo al escenario de simulación varios *prefabs* de agua del paquete *standard assets* de Unity, estirándolos y rotándolos de tal manera que la conjunción de todos los distintos fragmentos de agua forme una imagen realista de ríos y lagos.

Para dar realismo al terreno, fue necesario aplicar texturas al relieve acordes a la zona que se estuviese pintando. También mediante la herramienta de “pintar texturas” que aporta Unity, se fue coloreando todo el escenario con texturas del paquete *standard assets* y con otras obtenidas de forma gratuita a través de la tienda de *assets* de la misma aplicación (Figura 3-3). El plan de acción para pintar el terreno ha consistido en comparar visualmente las texturas a disposición con imágenes por satélite de Google Maps para aplicar cada una de una manera similar a lo que uno podría observar en un terreno como este.

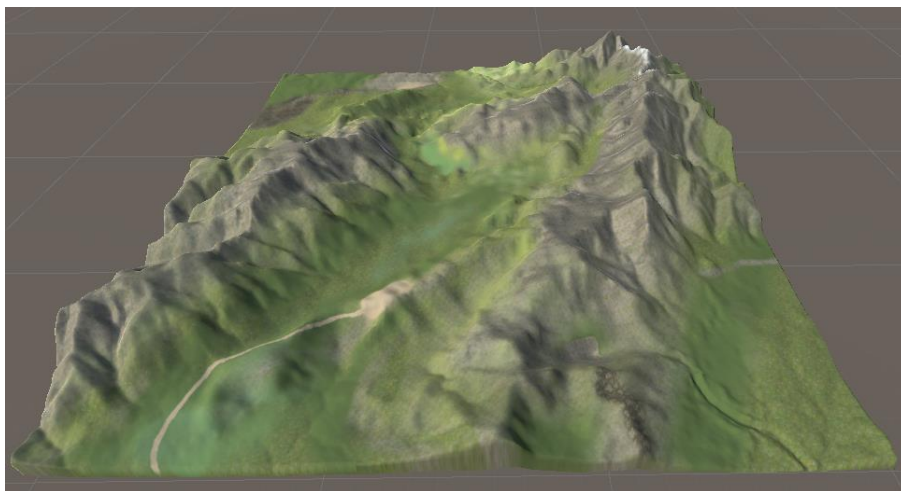


Figura 3-3: Terreno tras la aplicación de texturas

El paso final y más importante para completar el terreno es poblarlo con una vegetación variada y suficiente como para que se den situaciones realistas. De forma similar a las texturas, los *assets* usados para poblar el terreno son los disponibles en el paquete *standard assets* de Unity y otros varios obtenidos a través de la tienda de *assets* de Unity de forma gratuita. Entre los *prefabs* utilizados se encuentran árboles de distinto tamaño y coloración, variando a su vez cada tipo de árbol en cuanto a altura y tonalidad para una mayor sensación de realismo. Además de árboles, también se han esparcido por el escenario zonas con hierba y arbustos para rellenar algunas zonas y añadir más variedad al entorno.

Como toque final, se han añadido algunos caminos de tierra o cortafuegos en algunas de las zonas más frondosas para simular un terreno que tenga algunas zonas completamente naturales y otras que ya hayan sido ligeramente modificadas para la prevención de incendios (Figura 3-4).

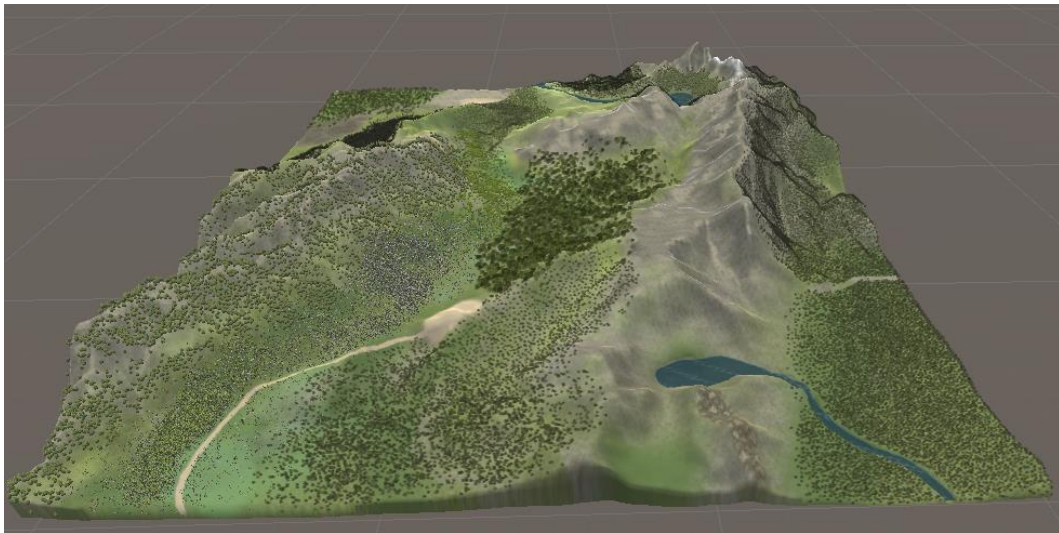


Figura 3-4: Terreno final para la simulación

El terreno final para la simulación aporta una gran variedad de zonas de relieve con vegetación que sería posible encontrar en distintos ecosistemas para poder incluir en el análisis la mayor variedad posible, además de zonas naturales y artificiales que puedan afectar a la dispersión de un posible incendio.

3.2 Drones

El tipo de dron elegido para este proyecto es un quadrotor o cuadricóptero, cuyas características le permiten desplazarse de punto a punto y levitar sobre un punto del terreno con facilidad (Garzón, y otros, 2016). Dependiendo del dron elegido, de si este es para uso profesional o no, la carga máxima y su velocidad punta varía. Para esta simulación se ha elegido un dron cuya velocidad de crucero es de 39 m/s o 140 km/h.

3.2.1 Punto de partida

En un entorno real, los drones el enjambre de drones ha de tener un punto de partida desde el que despeguen y pongan rumbo hacia los puntos del terreno que deban cubrir. El enjambre podría tener una base de carga a modo de punto de partida que fuese fijo en el terreno, ya que la visión aérea que estos aportan puede ser utilizada para otras tareas relacionadas con la supervisión de para la detección temprana de incendios o para la obtención de información durante un incendio. Para las tareas de prevención de este trabajo, el enjambre podría ser desplegado de forma periódica o cuando se considerase necesario actualizar la información

con la que consten los equipos de prevención de incendios. Al estar en un entorno simulado, el punto de partida para los drones se ha posicionado centrado en un lateral del terreno, para simular la idea de que los drones parten desde una zona más alejada. Independientemente de dónde se coloque este punto de partida, una vez se proporcione a los drones los puntos que deben recorrer, el resultado final será el mismo, sólo variando el tiempo de compleción dependiendo de la distancia que deban recorrer desde el punto de partida hasta su primer punto y desde su último punto de vuelta hasta el punto de partida.

3.2.2 Número de drones y características

El tiempo total necesario para obtener los resultados depende principalmente del tamaño del terreno que se debe fotografiar y del número de drones que se deban ocupar de la labor. Es importante tener en cuenta que los drones tienen un límite en cuanto a la autonomía de su batería, por lo que se debe calcular previamente el tiempo aproximado que cada dron tardará en completar el recorrido completo. Cada dron recorrerá una zona rectangular o cuadrada, así que es necesario decidir la ruta a seguir dentro de esa zona. Todos los cálculos de rutas y posición serán llevados a cabo por la estación base, un ordenador remoto que se encargue de proporcionar los puntos calculados a cada dron para que estos se limiten a completar su recorrido.

De acuerdo con las características generales de los drones mencionadas previamente, se ha decidido dividir el terreno en cuatro secciones iguales, es decir, cuatro cuadrados de 2,25 km² (225 hectáreas). Un terreno de este tamaño es posible cubrirlo con un solo dron de las características acordadas en un tiempo inferior a 20 minutos, dejando tiempo suficiente para el desplazamiento de ida y vuelta al punto de partida.

El objetivo de utilizar cuatro drones es que, en caso de querer cubrir un terreno mayor que el propuesto para este proyecto, tengamos varias opciones de acción. Calculando el tiempo aproximado que cada dron tardaría en recorrer su zona podría ampliarse las dimensiones de esta teniendo en cuenta el límite de su batería, o podría dividirse el terreno en más secciones y, o bien utilizar más drones de las mismas características si se dispone de ellos o utilizar los mismos drones para más de una zona, regresando antes al punto de partida para recargar su batería si fuese necesario. También sería posible obtener drones de mejores características (velocidad máxima, duración de batería) para cubrir con menos drones un mayor espacio.

3.2.3 Toma de imágenes

Cuando los drones alcancen cada punto predefinido, deberán posicionarse de tal manera que todas las fotografías se tomen con la misma orientación. Estas imágenes serán almacenadas identificando la posición en las que han sido tomadas para que la estación base pueda distinguirlas y fusionarlas más adelante. Para este proyecto se utilizarán cámaras de formato Super 35 con una distancia focal de 50mm.

3.3 Estación base

La estación base es el ordenador remoto cuya labor es calcular las rutas de los drones, fusionar las imágenes y tartar las imágenes para obtener los resultados deseados.

3.3.1 Rutas de los drones

Inicialmente, el terreno a recorrer se debe dividir en cuadrados de igual tamaño de tal manera que estos cubran todo el terreno. Una vez dividido, hay que decir en qué orden se recorrerá cada uno de los cuadrados, situando el dron en el punto central de cada uno. Se ha decidido crear dos opciones de recorrido que pueden aplicarse de forma independiente a cada dron sin afectar al resultado final, pero que puede preferirse dependiendo de la distancia del

variación de altura entre cada cuadrado, esta opción no es posible porque la diferencia de altura en los márgenes respecto al punto central del cuadrado supondría una pérdida de información (Figura 3-7).

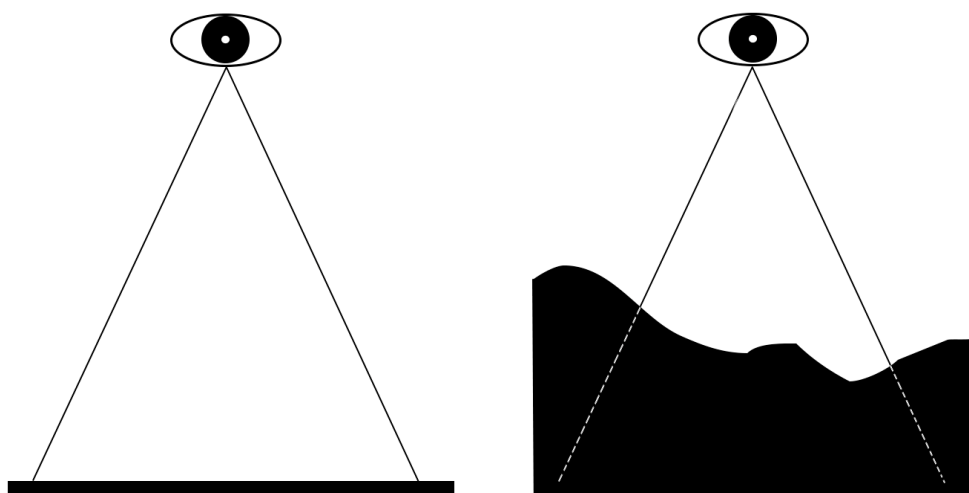


Figura 3-7: Comparación de la cantidad de terreno observado por una misma cámara dependiendo del relieve

Otra opción es la de situar los drones a una altura constante sobre el nivel del mar, pero eso conlleva un problema similar, que es que, en vez de perder información en los márgenes, se crea una región redundante que varía en cada casilla en tamaño. Además, para terrenos con gran variedad de altura este método supone acabar con un conjunto de imágenes cuyo objetivo puede estar relativamente cerca o a cientos de metros de altura, teniendo al final imágenes de menor calidad que otras.

Conociendo las características de la cámara montada en los drones, más concretamente la resolución de las imágenes a tomar y la distancia focal de la lente, podemos calcular una altura común sobre el terreno para cada punto (Valente, Sanz, Del Cerro, Barrientos, & de Frutos, 2012). Añadiendo a estos datos la cantidad de terreno que debe cubrir cada píxel y el porcentaje de superposición que deberán tener las fotografías tomadas. Calculando el largo de la imagen en base a la resolución de la imagen y la distancia enmarcada en cada píxel, multiplicando este valor por la distancia focal de la lente y dividiendo entre la dimensión de la imagen tomada por la cámara, obtenemos una altura adecuada para tomar imágenes con una redundancia similar en todas ellas.

$$Altura = \frac{Resolución\ de\ imagen * Terreno\ por\ pixel * Distancia\ focal}{Dimensión\ de\ imagen}$$

3.3.3 Cálculo de pendiente del terreno

Con la información previamente conocida del terreno que se va a sobrevolar, la estación base calculará el porcentaje de inclinación en todo el terreno, generando un “mapa de calor” de la pendiente que pueda ser analizado por expertos de prevención de incendios.

3.3.4 Fusión y tratado de imágenes

Una vez los drones hayan completado sus recorridos y hayan tomado y almacenado todas las imágenes, la estación base deberá juntar todas las fotografías tomadas por los drones para formar una composición única y final del escenario completo.

El método de fusión consistirá en juntar primero las imágenes capturadas por cada dron para más adelante fusionarlas todas juntas en una imagen completa. Se establecerá el porcentaje de superposición de cada imagen para poder juntarlas con la menor pérdida y redundancia final posible.

Por último, la imagen completa del escenario deberá ser tratada para eliminar todo aquello que no sea vegetación, creando una imagen de la disposición de la vegetación del terreno que los profesionales puedan observar y valorar en su toma de acciones de prevención de incendios.

3.3.5 Generación de imágenes adicionales de asistencia para la prevención de incendios

Como información adicional para asistir a los equipos de prevención de incendios, con la información obtenida a través del tratamiento de imágenes y de la pendiente del terreno, se generarán mapas de riesgo individuales en función de la densidad de vegetación y de la inclinación del terreno, además de una imagen que refleje el riesgo a lo largo del escenario en base a los dos factores juntos.

Tanto el mapa de vegetación como el de pendiente generados en los pasos anteriores serán fraccionados en casillas de un mismo tamaño fijo para representar la densidad e inclinación por pequeñas áreas, en vez de utilizar la información píxel a píxel, que no equivale a un área suficiente en el terreno real.

Para ambos casos, se asignará cada casilla de información un valor de una escala de riesgo y se generarán las imágenes que reflejen dichas asignaciones.

Por último, se creará una imagen final que represente un riesgo ponderado de los factores para todo el terreno.

4 Desarrollo

La implementación del entorno de simulación se ha realizado en el motor de videojuegos Unity, programando una serie de scripts en C#, además de un script en Python para el tratamiento de las fotografías y para la creación de imágenes con información útil resultante de los datos obtenidos. La utilización de Python para esta parte del desarrollo es muy útil gracias a las bibliotecas existentes para el tratamiento visual de imágenes que existen para este lenguaje.

4.1 Drones

El comportamiento de los drones (Figura 4-1) está contenido en el script *DroneController.cs*. Implementa funcionalidad necesaria para añadir puntos a su recorrido, los cuales almacena en una cola.

Cuando el método de inicio de movimiento es invocado se inicia una corrutina que extrae los puntos de la cola uno a uno. Cada vez que extrae un punto, lo establece como objetivo y se inicia el movimiento desde su posición hasta el punto. Gracias al método *Update* de C# para Unity, para cada fotograma de la simulación se actualiza la posición del dron en función de su velocidad actual.

Para lograr una simulación realista del vuelo de los drones, la velocidad del dron es calculada en función de la posición del dron respecto al punto anterior y al punto objetivo. Para ello, cuando el dron se encuentre a menos de una cierta distancia de aceleración/deceleración del punto de partida o del objetivo, la velocidad irá incrementando y decrementando linealmente en esa distancia de aceleración/deceleración según se vaya alejando del punto de partida o acercando al punto objetivo, respectivamente. En los puntos de parada el dron estará quieto y su velocidad llegará hasta un máximo definido en la clase *DroneController* que alcanzará cuando haya superado la distancia de aceleración y empezará a reducir una vez alcance la distancia de deceleración.

En cada actualización del método *Update* también se comprueba si la posición actual es la posición objetivo. De ser así, una vez se haya detenido el dron en esa posición, rotará sobre sí mismo para que todas las fotos tomadas tengan la misma orientación.

La corrutina de desplazamiento, una vez el dron haya llegado al objetivo, tomará la captura del terreno que se encuentra bajo el dron y la almacenará con un nombre que indica las coordenadas sobre el plano bidimensional para que la estación base pueda identificarlas.

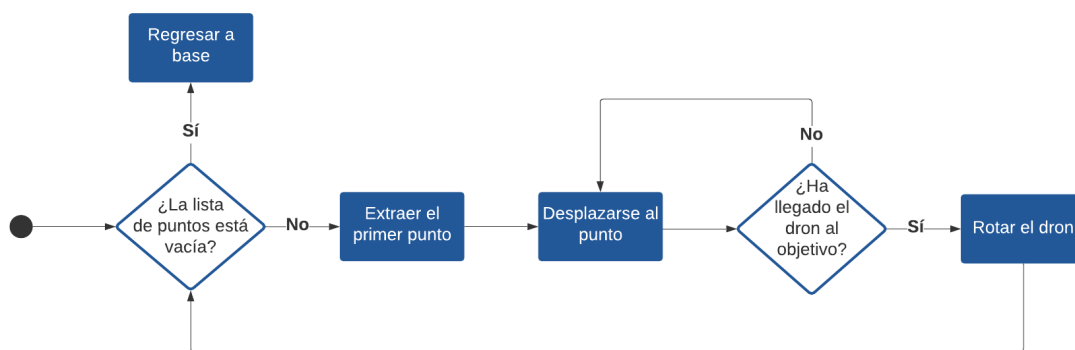


Figura 4-1: Proceso de decisión de los drones

4.2 Estación base

La funcionalidad de la estación base está dividida en tres scripts distintos. El comportamiento relativo a la simulación de movimiento y obtención de datos se encuentra repartido en dos scripts en lenguaje C# para Unity (*BaseStation.cs* y *Planner.cs*), mientras que la funcionalidad encargada del tratamiento de imágenes y generación de resultados está programada en Python.

4.2.1 Control y fusión de imágenes

El script principal *BaseStation.cs* es el encargado de iniciar el movimiento de los drones, proporcionándoles los puntos que deben recorrer, esperar a que finalicen y fusionar las imágenes tomadas por los mismos y generar los datos necesarios para crear un mapa de inclinación.

En un escenario real, el tamaño del terreno a cubrir será conocido previamente. Para la simulación, el terreno a ser mapeado es el simulado en Unity, por lo que es posible obtener las dimensiones de este para calcular los puntos que deberán recorrer los drones.

De acuerdo con el diseño propuesto, el terreno será cubierto utilizando cuatro drones, dividiendo el escenario en cuatro secciones de igual tamaño y calculando la ruta para cada una de esas zonas.

La estación base, tras haberse calculado los puntos que debe recorrer cada dron, los proporciona a cada uno de ellos e inicia su movimiento. Mientras los drones realizan su recorrido, la estación base queda en espera que finalicen su trabajo.

Mientras tanto, la estación se encarga de calcular los datos necesarios para generar el mapa de inclinaciones. Para ello, al conocerse previamente el relieve del terreno, es decir, el mapa de alturas de este es posible calcular la inclinación entre dos puntos haciendo la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las alturas de esos dos puntos.

$$Pendiente = \sqrt{Altura(x_1, y_1)^2 + Altura(x_2, y_2)^2}$$

Para obtener datos relevantes acerca de la pendiente del terreno, se aplica esta fórmula para todos los puntos del escenario separados por una distancia de 10 metros y se vuelcan los datos obtenidos a un fichero de texto para representar la información en un mapa de riesgo más adelante.

Una vez los drones han acabado, la estación base es la encargada de fusionar todas las fotografías tomadas por los drones en una sola imagen de alta resolución. El método utilizado consiste primero en unir las imágenes tomadas por cada uno de los drones para cada sección del escenario y después juntar las composiciones de cada zona en una única imagen final.

Para las imágenes de una misma sección, hay que tener en cuenta la redundancia deseada existente entre unas imágenes y otras. Para este proyecto, teniendo en cuenta las características de las cámaras montadas en los drones, la redundancia deseada es de un 5%, por tanto, es necesario superponer una imagen sobre otra en ese porcentaje por sus bordes para obtener una fotografía correcta. Este efecto se ha conseguido descartando ese porcentaje del borde derecho e inferior de las fotografías tomadas de una misma región a excepción de las hechas en la última columna o en la última fila de la zona fotografiada. De esta forma, se consigue una imagen similar a la que podría obtenerse desde un satélite de alta resolución, pero con las ventajas que supone no depender de ese tipo de tecnología y poder repetir la toma de imágenes con la frecuencia deseada.

El proceso para fusionar las composiciones de cada región en una fotografía final es el mismo. En este caso, para descartar el 5% de redundancia de los márgenes, se resta a la longitud total de píxeles de la fotografía de cada región la cantidad de píxeles que se descartaban a la hora de fusionar las imágenes individuales anteriores.

Gracias a la alta precisión de localización geográfica y a la estabilidad que podemos conseguir con los drones, el resultado de este proceso es una fotografía de alta resolución de todo el escenario lista para ser tratada de la manera deseada.

4.2.2 Planificador

El código relativo al cálculo y planificación de rutas de los drones se encuentra aislado en un script en lenguaje C# llamado *Planner.cs*. En este se define el método encargado de calcular los puntos que ha de recorrer un dron y de ordenarlos en función del algoritmo deseado.

Para calcular los puntos del recorrido, se deben primero proporcionar los datos del terreno a cubrir mediante las coordenadas de la esquina superior izquierda (noreste) del cuadrante. Para la simulación en Unity basta con utilizar el sistema de coordenadas del motor, cuya unidad de distancia es el equivalente a un metro del terreno real en este trabajo. Para la utilización del sistema en un entorno real, el sistema de coordenadas de Unity tendría que ser reemplazado por un sistema de geolocalización real mediante un sistema de coordenadas real como el UTM que sirva para que los drones puedan desplazarse de punto a punto con precisión.

Es necesario también conocer la distancia focal de la lente de la cámara y su dimensión de imagen además de la dimensión del terreno objetivo. Este valor se calcula en base a la resolución de la imagen que se va a tomar y la cantidad de terreno que se desea representar por cada píxel. Para este proyecto, ha sido suficiente tomar imágenes de 800x800 píxeles, representando en cada píxel 250 milímetros. Con estos tres últimos valores, la dimensión del terreno objetivo, la dimensión de la imagen y la distancia focal de la lente, es posible calcular la altura adecuada de vuelo sobre el terreno para capturar imágenes con la redundancia deseada.

Con todos estos datos, el número de filas y columnas de fotografías necesarias para mapear el terreno se calcula dividiendo la anchura y altura de la sección entre la dimensión del terreno objetivo proporcionado, es decir, la cantidad aproximada de espacio que se desea representar en cada fotografía individual. El resultado de esta división se redondea para poder dividir el terreno en un número exacto de filas y columnas, y se establece la dimensión final de las fotos que se van a tomar dividiendo las dimensiones del terreno entre el número de filas y columnas calculado.

Los puntos por recorrer son los centros de los cuadrados definidos por el número de filas y columnas calculado, y gracias a que se conocen las coordenadas reales de toda la sección que se está sobrevolando, es posible asociar cada punto a una coordenada real en el terreno. La tercera coordenada del punto, la altura, se calcula como la suma de la altura sobre el terreno calculada antes más la altura sobre el nivel del mar de ese punto del escenario. Este cálculo es necesario para la simulación de Unity porque la posición de un objeto dentro del escenario se calcula respecto a la coordenada (0, 0, 0), así que se debe obtener la altura del terreno en cada punto (cuya base se encuentra a altura 0) y sumarla a la altura sobre el terreno a la que se desea que vuelen los drones. Estos puntos se almacenan en una matriz para facilitar su ordenamiento.

Por último, hay que ordenar los puntos calculados de acuerdo con uno de acuerdo con uno de los dos algoritmos ideados, el de espiral y el de zigzag. Ambos algoritmos comienzan en el mismo punto, el superior izquierdo.

El ordenamiento en espiral sigue el sentido de las agujas del reloj, mientras que el ordenamiento en zigzag hace un movimiento ondulante hacia el punto inferior derecho de la matriz. Los puntos ordenados son almacenados en una lista que la base puede proporcionar a los drones para que sea recorrida de uno en uno.

4.2.3 Tratamiento de imágenes y obtención de resultados

La creación de imágenes de resultado y tratamiento de las existentes se ha programado en Python. El script se encarga de procesar la imagen formada por las fotografías tomadas por los drones para generar una imagen final que represente la densidad de vegetación en el mapa y forma el mapa de pendiente en base a los datos guardados por la estación base en el archivo de texto antes mencionado.

Existían dos opciones para proceder con el tratamiento de la imagen compuesta por las fotografías tomadas por los drones: un acercamiento cuantitativo que estudiase el número de elementos de vegetación en áreas de un tamaño definido, o un método cualitativo o visual, que aplicase una serie de filtros a la imagen para obtener una representación visual de la densidad de vegetación. El método cuantitativo suponía una serie de problemas que lo han convertido en una opción menos deseable. Para obtener buenos resultados de esta manera, es necesario utilizar un método de segmentación de imágenes que utilice un modelo entrenado para distinguir los elementos de vegetación de todo lo demás que se pueda encontrar en el terreno. El principal problema de esta opción es que la gran variedad de vegetación que se podría fotografiar podría suponer crear un modelo incompleto o impreciso si el enjambre de drones se utiliza en ecosistemas demasiado distintos.

Por este motivo, se ha optado por un tratamiento visual de la imagen más cualitativo, que filtre la información de la fotografía y descarte en varias etapas toda la información no deseada.

En este proceso (Figura 4-2) se han utilizado varias bibliotecas, siendo las más importantes para el tratado de imágenes *numpy*, el módulo *Image* de la librería *PIL* y la biblioteca *OpenCV* (*cv2*).

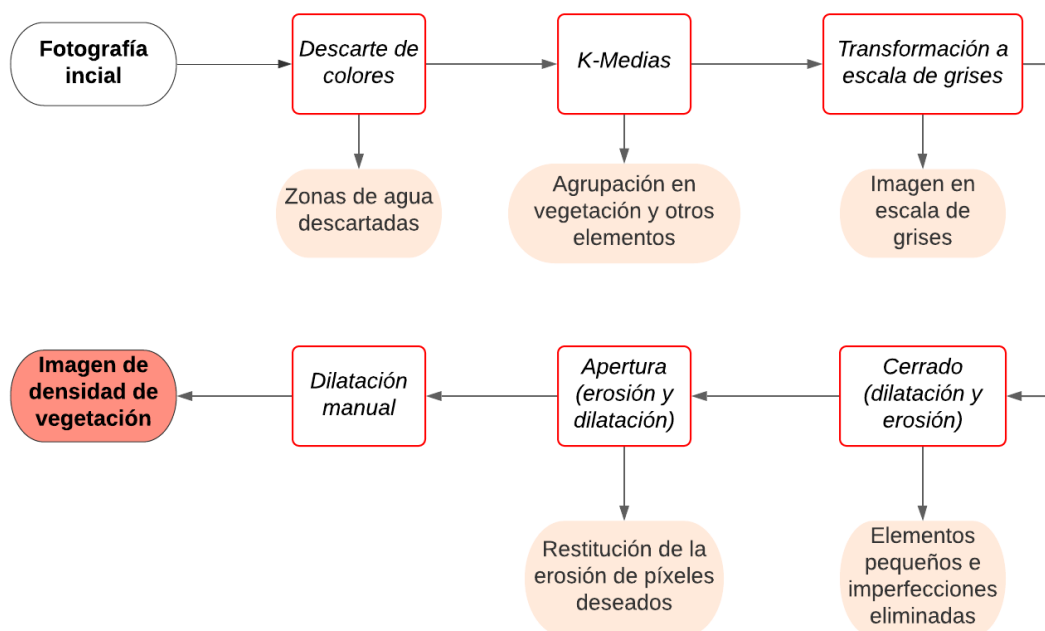


Figura 4-2: Proceso del tratamiento de la imagen aérea

El primer paso para obtener la imagen final consiste en descartar el canal de color azul en aquellas zonas donde sea predominante, es decir, principalmente en zonas de agua. Este filtrado facilita el reconocimiento posterior de la vegetación y no afecta de manera negativa al reconocimiento de otras zonas. Para conseguir este efecto, utilizando la funcionalidad de la biblioteca *Image*, se itera a través de todos los píxeles de la imagen original y se

comprueba si el color del píxel es predominantemente azul. Para determinar si un píxel es mayormente azul, tras varias pruebas, se ha establecido que el valor del canal azul debe tener un valor superior a 70 (siendo 255 el valor máximo para cada canal del modelo RGB), mientras que los otros dos canales de RGB (rojo y verde) deben tener un valor inferior a 100. Esto es así, porque, aunque el canal azul tenga un valor alto, si alguno de los otros dos o los dos canales tienen un valor elevado, el color del píxel no será azul sino una combinación de los tres más cercana a otros colores como el rosa, el morado, o el blanco. El resultado de este proceso deja una imagen en la que los colores que puedan afectar al paso siguiente no influyan en el resultado.

El siguiente y más importante paso consiste en realizar un agrupamiento (clustering) mediante el método k-medias (k-means) de la imagen resultante del paso anterior para descartar todos los elementos del terreno que sean relevantes para la prevención de un incendio. Utilizando métodos disponibles en la biblioteca *OpenCV*, se lee la imagen tratada anteriormente y se somete a la agrupación. Para agrupar los valores de los píxeles, es necesario definir tres cosas.

Primero, hay que especificar cuál es el criterio de parada para el algoritmo. Tras varias pruebas, se ha aproximado que un valor adecuado para este criterio es que se pare cuando se hayan alcanzado 30000 iteraciones o la precisión sea del 95%, es decir, que un máximo de un 5% de las asignaciones siga cambiando. Hay que definir el valor de k , es decir, el número de grupos en los que se agruparán los valores de la imagen. Mediante un proceso de prueba y error similar al anterior, se ha determinado que el valor más adecuado para esta variable es de 2. Con un número tan reducido de grupos podemos descartar con facilidad todas las imperfecciones de la imagen y elementos que no son relevantes para el análisis de riesgos. Por último, se han situado los centroides de forma aleatoria, ya que el criterio de parada tiene suficientes iteraciones como para no preocuparse de su posición inicial.

Habiendo establecido estos valores, la imagen se somete a la agrupación y el resultado se almacena en una nueva imagen en la que toda la vegetación queda destacada y sólo quedan una serie de imperfecciones que entorpezcan la visualización.

A continuación, se procesa la imagen del paso anterior para eliminar pequeños elementos que hayan sido agrupados junto a la vegetación que no sean interesantes para el objetivo del proyecto. Lo primero que se ha decidido hacer es convertir la imagen a escala de grises, aprovechando para descartar las tonalidades más claras de la imagen que corresponden al grupo de no vegetación. Tras esto, la imagen se somete a dos transformaciones morfológicas mediante métodos de *OpenCV*. La primera transformación consiste en el cerrado de la imagen, que supone un proceso de dilatación seguido de uno de erosión. Esta transformación sirve para descartar pequeños puntos de la imagen que no son relevantes o no suponen ningún riesgo para el entorno. Este proceso no sólo afecta a los pequeños puntos, sino también al resto de formas de la imagen que sí que representan vegetación. Para revertir el erosionado de las zonas que se pretenden conservar, se realiza una transformación de apertura, que es el proceso inverso al de cerrado. La erosión seguida de la dilatación de los píxeles de la imagen extiende de nuevo las formas de la imagen, pero no recupera los detalles no interesantes descartados en el proceso anterior.

El último paso es una dilatación manual por aproximación de los píxeles. Para esta etapa, se leen todos los valores de los píxeles de la imagen y para aquellos que sean negros, es decir que se consideren vegetación, se pintan de negro los píxeles para aumentar ligeramente los márgenes de las formas que se hayan podido erosionar a lo largo del proceso de tratamiento de la imagen.

4.2.3.1 Creación de mapas de riesgo para la prevención de incendios

Este script también genera una serie de imágenes útiles para facilitar la identificación de zonas de riesgo en base a los factores de estudio. Primero genera el mapa de inclinación del

terreno utilizando las pendientes calculadas para cada 10 metros del escenario que han sido almacenadas en el archivo de texto mencionado anteriormente. Para obtener los mismos resultados para la densidad de vegetación que para la pendiente, es útil dividir la imagen resultante del proceso de tratamiento en casillas del mismo tamaño que las utilizadas para el cálculo de inclinación.

Al haber utilizado un método cualitativo para determinar la cantidad de vegetación en el terreno que representa con píxeles negros aquellas zonas en las que hay vegetación y con píxeles blancos las zonas donde no la hay, para representar la densidad en cada casilla se ha obtenido el porcentaje de píxeles blancos en cada casilla y se ha compuesto una nueva imagen en escala de grises en la que el color de cada casilla sea un gris correspondiente a porcentaje de blanco en esa zona. Es decir, con la escala de 0 a 255, siendo 0 el color negro y el 255 el blanco, el color final de esa área será más oscuro cuantos más píxeles negros haya, es decir, cuanta más vegetación se considere que hay en esa región.

Para que estas imágenes sirvan para distinguir zonas de alto riesgo de las que no requieren tanta atención, cada sección de cada imagen es clasificada según una escala de riesgo y representado de nuevo en una imagen con colores para poder identificar rápidamente el nivel de riesgo de un punto del mapa.

La pendiente es un factor determinante para la expansión de un incendio. Aunque depende del tipo de vegetación que se esté quemando, de su cantidad sobre la superficie y de su estado, en todos los casos el incremento de la inclinación del terreno supone un crecimiento exponencial de la tasa de quemado de una zona. Por este motivo, se han establecido los siguientes niveles de riesgo en función de los grados de inclinación del terreno (Tabla 1).

Grado de inclinación (°)	Nivel de riesgo
[0, 5]	1
(5, 15]	2
(15, 25]	3
(25, 35]	4
(35, 45]	5
(45, 90]	6

Tabla 1: Niveles de riesgo por grados de inclinación del terreno

De la misma manera, se ha establecido una escala de riesgo para la densidad de vegetación observada por los drones. Para determinar qué nivel de riesgo tiene una zona en función de la vegetación se ha utilizado el porcentaje de píxeles por área calculado anteriormente para crear la imagen de densidad de vegetación. Al no ser un valor estudiado como la inclinación, se ha optado por los siguientes rangos de riesgo para este factor (Tabla 2).

Porcentaje de vegetación (%)	Nivel de riesgo
[0, 16.67]	1
(16.67, 33.33]	2
(33.33, 50]	3
(50, 66.67]	4
(66.67, 83.33]	5
(83.33, 100]	6

Tabla 2: Niveles de riesgo por porcentaje de vegetación en una sección

Los valores de ambas tablas podrían ser ajustados a elección por el equipo que pretenda utilizar el sistema para obtener otra clasificación de riesgos distinta.

Una vez se le haya asignado a cada casilla un nivel de riesgo de acuerdo a los dos factores, los resultados se representan en dos imágenes distintas en las que cada nivel de riesgo queda indicado por un color distinto.

El último resultado por obtener es una imagen que represente el nivel de riesgo de cada zona del terreno en función de la unión de estos dos factores. Se ha determinado que la pendiente es un factor de riesgo en aquellas zonas donde exista vegetación o la vegetación sea muy próxima. Al haberse calculado el riesgo por densidad de vegetación por secciones de 100 m², se han considerado como zonas de riesgo aquellas cuyo porcentaje de píxeles negros sea superior a 0, es decir, sólo se ha hecho un cálculo ponderado de riesgo en las casillas en las que existe vegetación. La fórmula utilizada para calcular el riesgo ponderado en las regiones que cumplan esta condición es la siguiente:

$$Valor = \frac{Porcentaje\ de\ densidad * 0,75 + \frac{Nivel\ de\ riesgo\ por\ inclinación}{6} * 0,25}{100}$$

Las casillas que no cumplían con la condición reciben un valor igual a 0, ya que el riesgo considerado para ellas es nulo o de atención innecesaria. La clasificación de riesgo final ponderado para los distintos puntos del mapa sigue los valores especificados en la Tabla 3.

Valor resultado	Nivel de riesgo
[0, 16.67]	1
(16.67, 33.33]	2
(33.33, 50]	3
(50, 66.67]	4
(66.67, 83.33]	5
(83.33, 100]	6

Tabla 3: Niveles de riesgo según el valor obtenido por la fórmula de riesgo ponderada

De la misma manera que para las imágenes de riesgo por cada factor, se genera una imagen que representa con colores el riesgo de cada zona.

5 Integración, pruebas y resultados

Con los resultados obtenidos de la simulación se pretende probar la eficiencia de los algoritmos de planificación de ruta de los drones, si las imágenes compuestas mediante la fusión de las fotografías por los drones resultan en una representación válida del terreno sobrevolado, si los valores elegidos para el clustering devuelven resultados adecuados y si la representación final del riesgo de cada punto del terreno aporta información relevante.

5.1 Algoritmos de ruta

El primero de los resultados obtenidos es la distancia recorrida y el tiempo que le lleva a dron completar el mismo recorrido dependiendo del algoritmo utilizado. Para valorar esto, se ha medido para un mismo dron, la distancia y el tiempo que le lleva al dron desplazarse desde el primer punto de su ruta hasta el último, sin tener en cuenta los desplazamientos desde y hacia el punto de partida (Tabla 4).

Algoritmo	Distancia recorrida (metros)	Tiempo
Espiral	12222,31	9 minutos y 16 segundos
Zigzag	16008,98	10 minutos y 58 segundos

Tabla 4: Resultados de tiempo y distancia recorrida para cada algoritmo de ruta

Al haber utilizado un algoritmo de zigzag diagonal, la distancia recorrida por los drones siguiendo la ruta definida por este algoritmo es mayor que la recorrida por la ruta en espiral. El resultado final de las imágenes obtenidas por los drones es independiente de la ruta seguida, por lo que, a la vista de los resultados, resulta más favorable utilizar el algoritmo de recorrido en espiral, que traza una ruta más corta y permite cubrir más terreno en el mismo tiempo que con el algoritmo zigzag.

5.2 Fotografías de los drones

Las fotografías individuales tomadas por cada dron son almacenadas para que la estación base pueda fusionarlas una vez hayan finalizado sus rutas los drones (Figura 5-1).

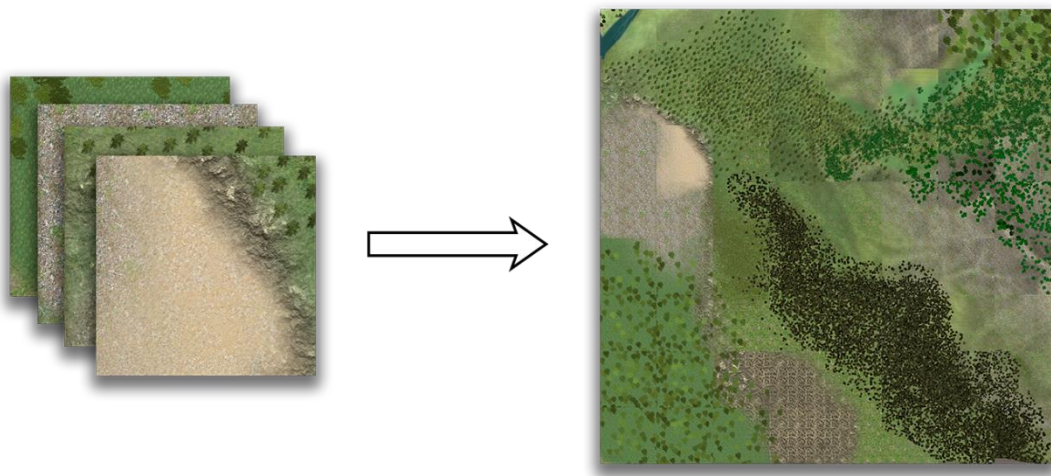


Figura 5-1: Fusión de las imágenes de una sección

Este proceso se aplica para cada conjunto de imágenes de cada región, formando cuatro imágenes compuestas independientes correspondientes al terreno sobrevolado por cada uno de los cuatro drones. Las imágenes individuales tienen unas dimensiones de 800x800 píxeles, y las imágenes resultantes de la unión de las fotografías de un sector es de 6120x6120 píxeles.

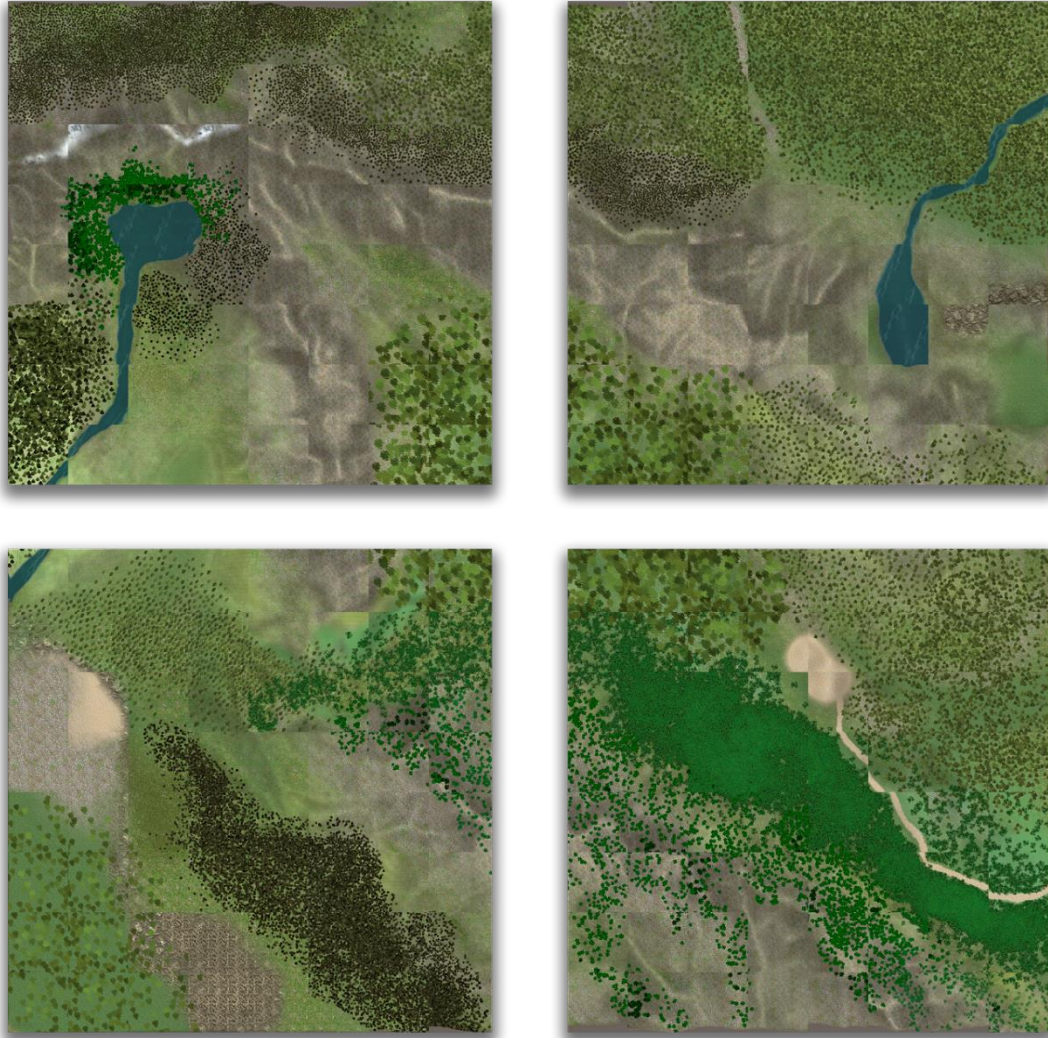


Figura 5-2: Fusión de las cuatro regiones por separado

Una vez se han obtenido las imágenes compuestas de cada región (Figura 5-2), estas se fusionan en una única imagen que represente el escenario completo mediante el mismo método utilizado para unir las fotografías individuales. La resolución de la imagen compuesta final es de 12200x12200 píxeles. Las dimensiones de la imagen final dependerán de las dimensiones del terreno sobrevolado y de las características de la cámara utilizada.

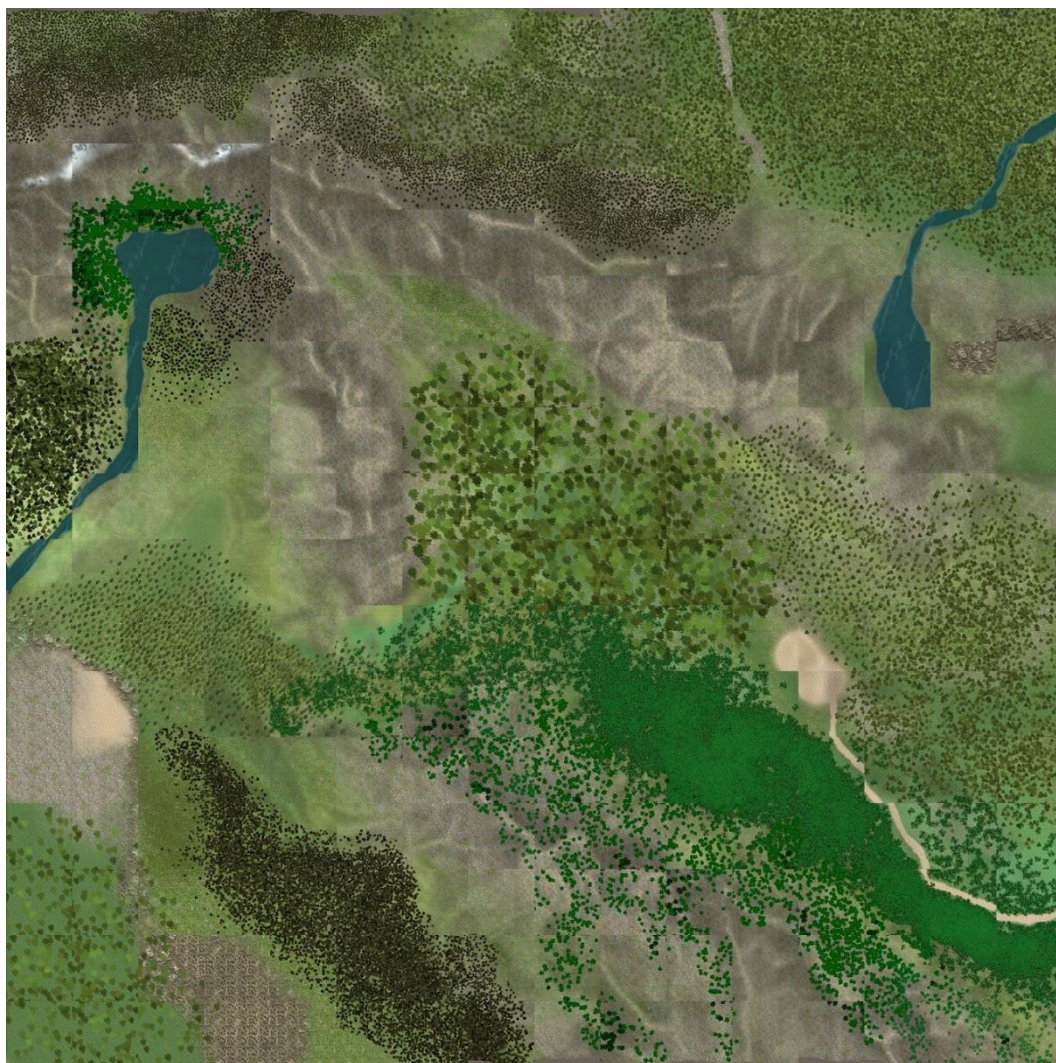


Figura 5-3: Fusión completa del escenario

La imagen compuesta formada mediante la fusión de las fotografías individuales (Figura 5-3) representa el terreno real con muy poco margen de error en los márgenes de las imágenes unidas. Estos defectos se deben a que la altura calculada para tomar las fotografías es tan sólo una aproximación que permite formar una imagen compuesta a partir de varias imágenes individuales con un alto grado de precisión.

Como se ha explicado antes, la asignación de riesgos se hace por subsecciones del terreno, en vez de píxel a píxel, por lo que esos pequeños defectos en los márgenes de fusión resultan irrelevantes para el resultado final.

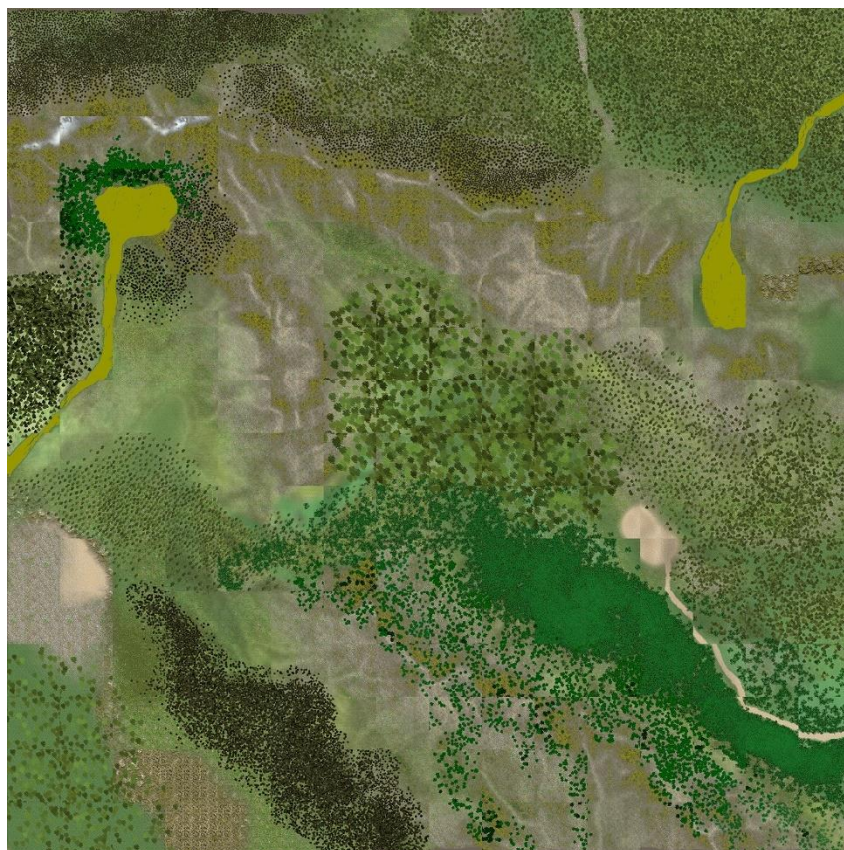


Figura 5-4: Imagen procesada tras eliminar las zonas principalmente azules

El proceso de eliminación de las zonas de agua reemplaza el color de estas por un tono que no afecta a los siguientes pasos del tratamiento (Figura 5-4).

Para el clustering se probaron distintos valores para el número de grupos a los que podían asignarse los píxeles. Los resultados obtenidos según se incrementa ese valor resulta más desfavorable para la división entre vegetación y no vegetación. Como ejemplo se muestran los resultados de la agrupación en 3 y 4 grupos (Figura 5-5). Estos valores hacen que texturas del terreno visibles en la fotografía que no son interesantes para la estimación de riesgo quedan resaltadas y afectan a los posteriores pasos del tratamiento de la imagen.

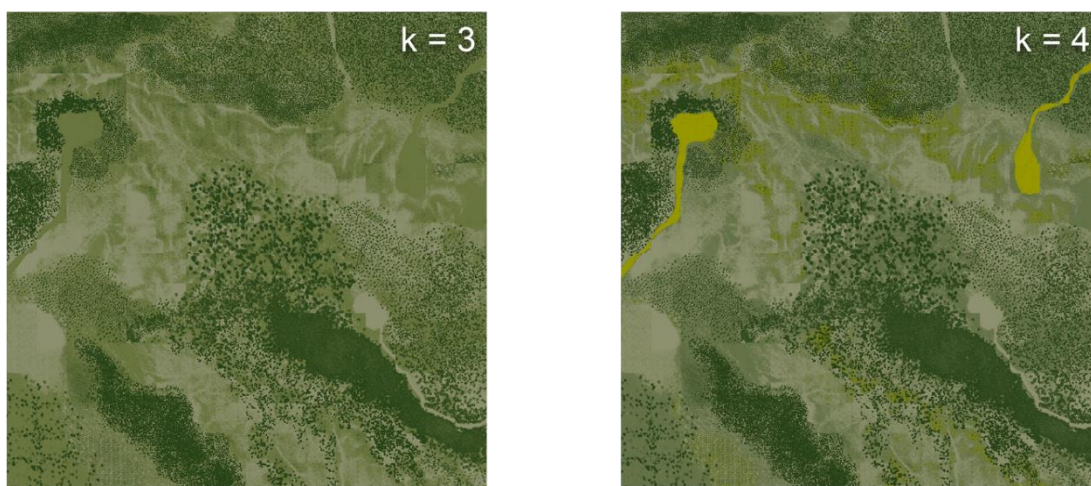


Figura 5-5: Agrupamientos fallidos para 3 y 4 grupos

Para 4 clusters se aprecia que las zonas de agua y las texturas de la montaña entre los dos lagos quedan agrupados en dos grupos distintos, mientras que para 3 clusters estos quedan en el mismo grupo. En ambos casos existe un tercer grupo para los elementos no interesantes del terreno, y estas zonas de agua y montaña no están en ese grupo. No es necesario realizar un clustering en tantos grupos.

Los mejores resultados de clustering k-medias (k-means) se obtienen para 2 grupos (Figura 5-6). Con este valor de k, la cantidad de elementos del terreno que no son vegetación y quedan agrupados junta esta es mínima, y son eliminados en su gran mayoría en los posteriores pasos del tratamiento de la imagen.

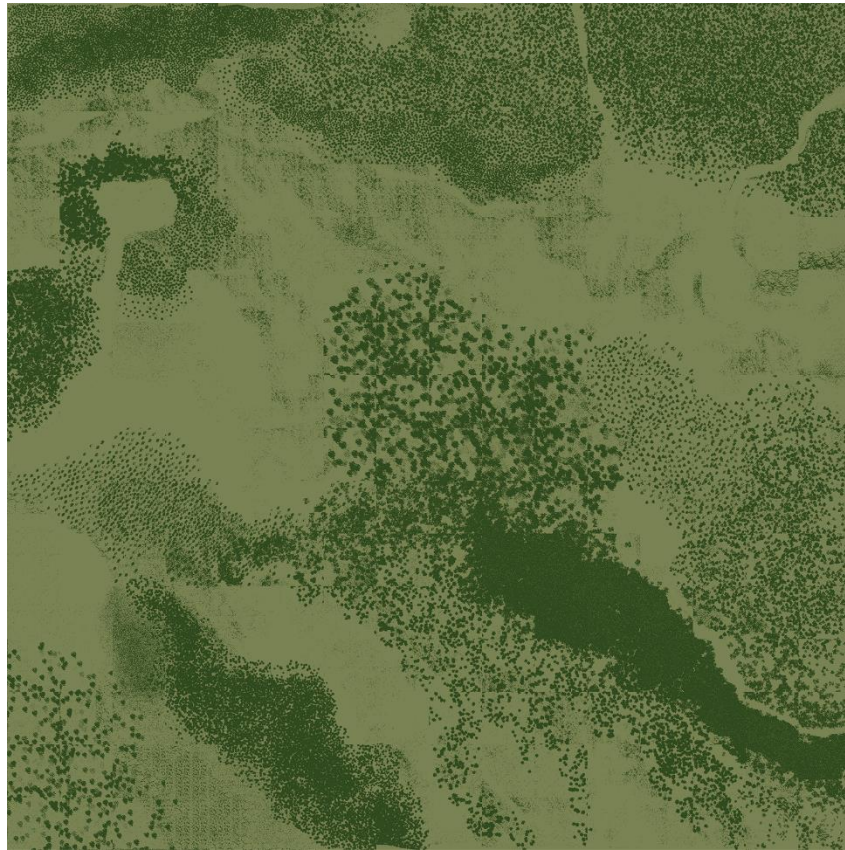


Figura 5-6: Imagen resultante del proceso de agrupamiento k-medias para 2 grupos

Tras haber sometido la imagen al proceso de clustering, el resultado se perfecciona mediante los pasos descritos en el desarrollo del tratamiento de imágenes. Primero se transforma la imagen a escala de grises, descartando el grupo de elementos no considerado vegetación (representándolo con píxeles blancos). Al tener el grupo de vegetación en negro y el resto en blanco, el siguiente proceso de cerrado de píxeles erosiona todo el primer grupo eliminando la mayor parte de las imperfecciones restantes. Por último, el proceso de apertura dilata los píxeles negros para recuperar el estado previo a la erosión, habiendo descartado ya los elementos no deseados que habían sido agrupados incorrectamente (ver Figura 5-7).

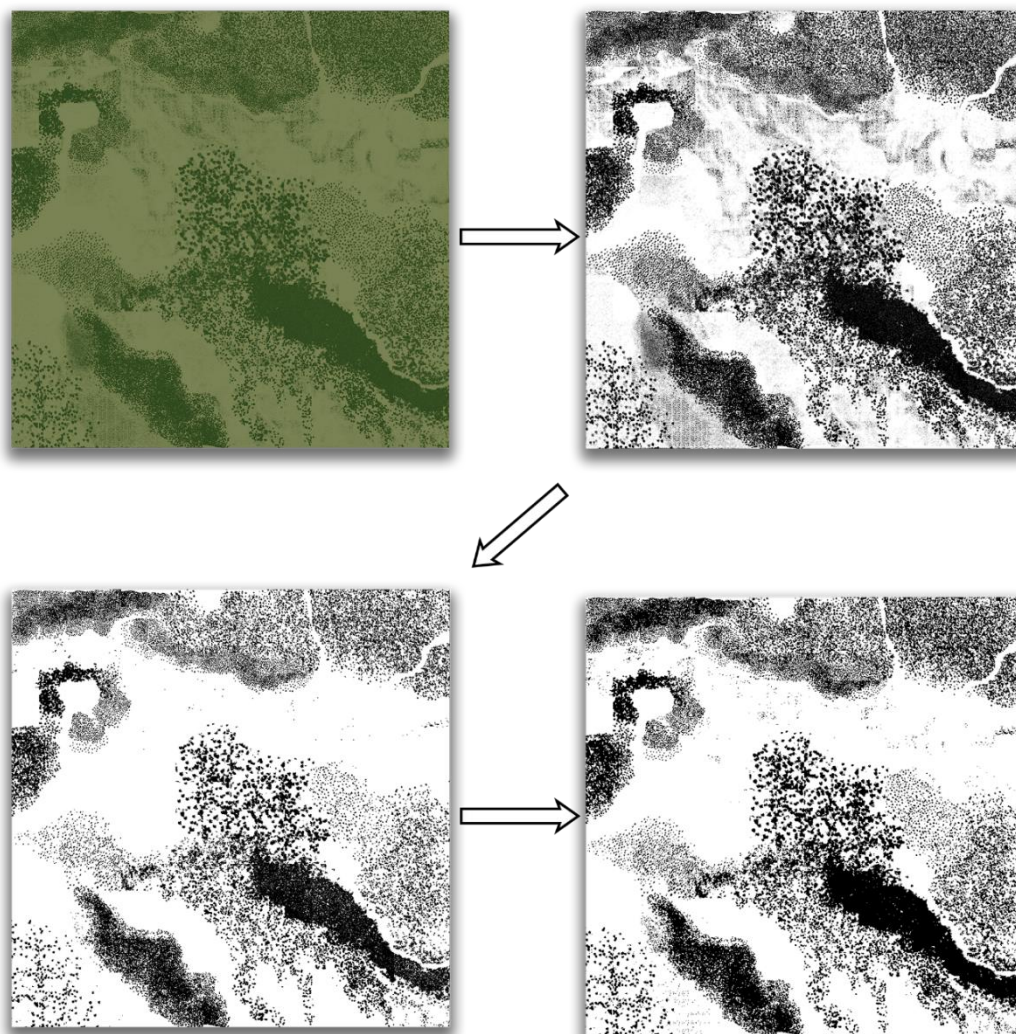


Figura 5-7: Evolución de la imagen tras el proceso de conversión a escala de grises, cerrado y apertura de la imagen

Antes de realizar la asignación de riesgos para cada zona del mapa, la imagen el grupo de la vegetación se expande por última vez mediante el proceso detallado en el apartado de desarrollo. Esto resulta en una imagen aérea final en la que todos los píxeles negros representan un lugar del terreno donde hay vegetación (Figura 5-8).

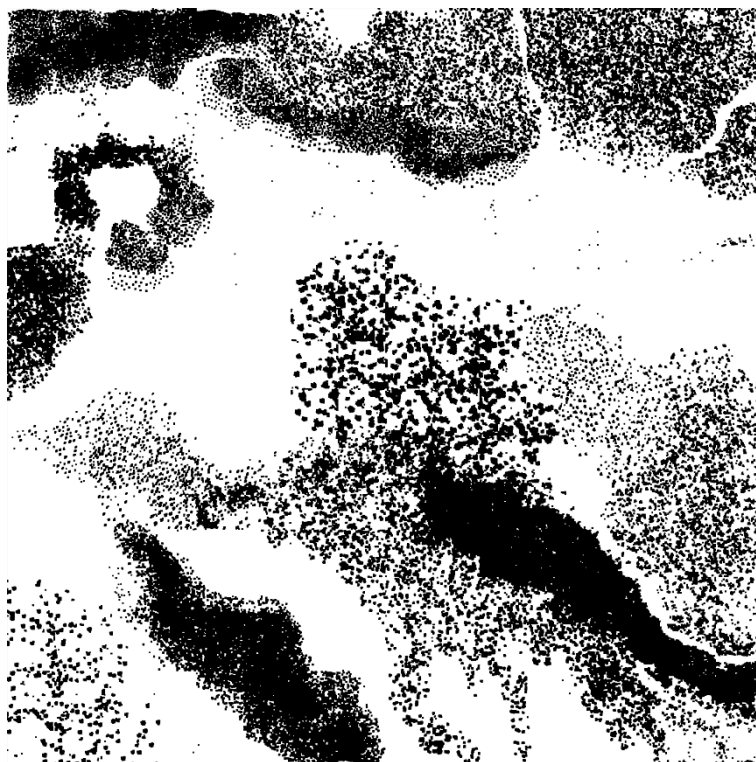


Figura 5-8: Imagen final de densidad de vegetación

Como se detalla en las secciones de diseño y desarrollo, la asignación de riesgo del mapa se hace para secciones de un tamaño fijo. Utilizando la imagen anterior se crea la siguiente figura, que representa la densidad de vegetación para secciones de 100 m² en el terreno (Figura 5-9). Las casillas son más oscuras cuanto más vegetación se observe en esa zona.

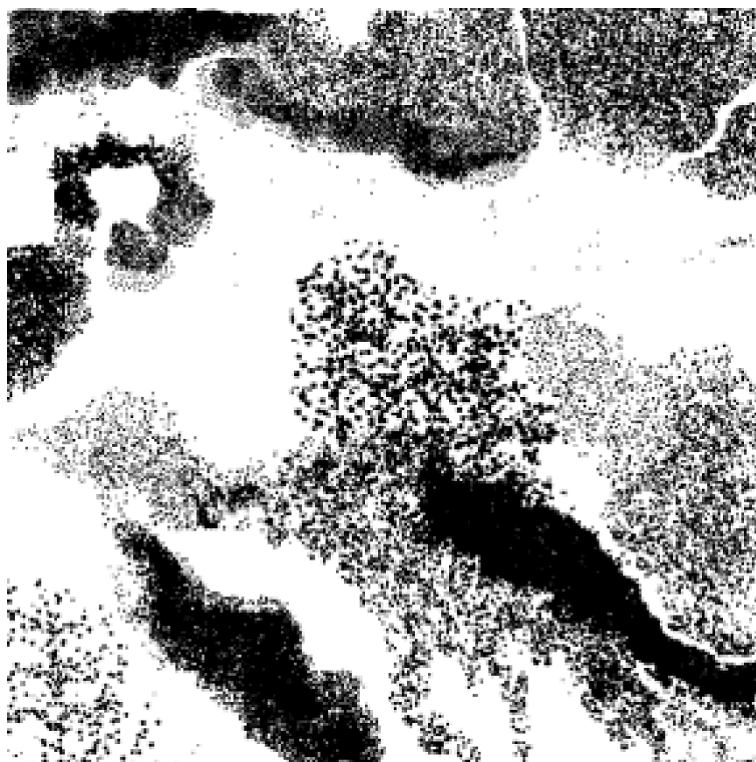


Figura 5-9: Mapa de calor de densidad de vegetación

Utilizando los datos calculados de pendiente para las regiones del mismo tamaño, se crea una imagen en escala de grises (Figura 5-10) que representa los grados de inclinación a lo largo del terreno. Esta imagen es sencillamente auxiliar y no es un resultado final, aunque puede considerarse útil para observar la distribución de pendiente en el terreno y planear rutas para el despliegue de bomberos y equipos de protección forestal.

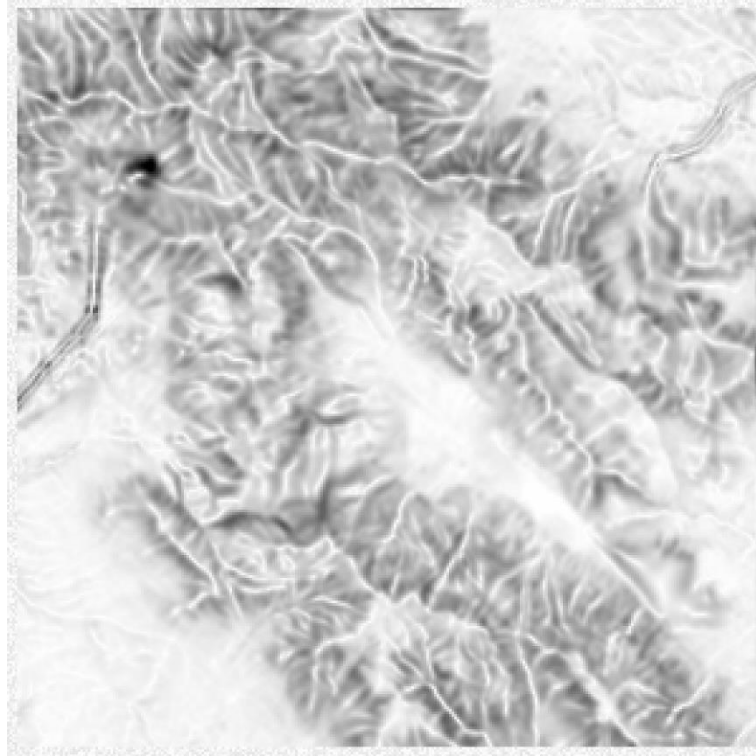


Figura 5-10: Mapa de calor de la pendiente del terreno

La obtención final de resultados consiste en la asignación de riesgo a cada zona del terreno, de tal manera que los equipos de prevención de incendios puedan identificar rápidamente secciones del área observada que requieran tomar acciones o ser revisadas para realizar modificaciones al terreno o a la vegetación.

Los resultados son tres imágenes distintas que representan, según una escala predefinida, el riesgo del terreno en función de la densidad de vegetación, la pendiente del terreno y la conjunción de ambos factores.

La imagen de riesgo por densidad de vegetación (Figura 5-11) muestra cómo las zonas en las que no se había detectado vegetación tras el proceso de tratamiento de la imagen se consideran de riesgo nulo, y a aquellas zonas en las que sí que existe vegetación se les ha asignado un nivel de riesgo acorde al porcentaje de vegetación observada en ellas siguiendo la tabla de valores establecidos para ello.

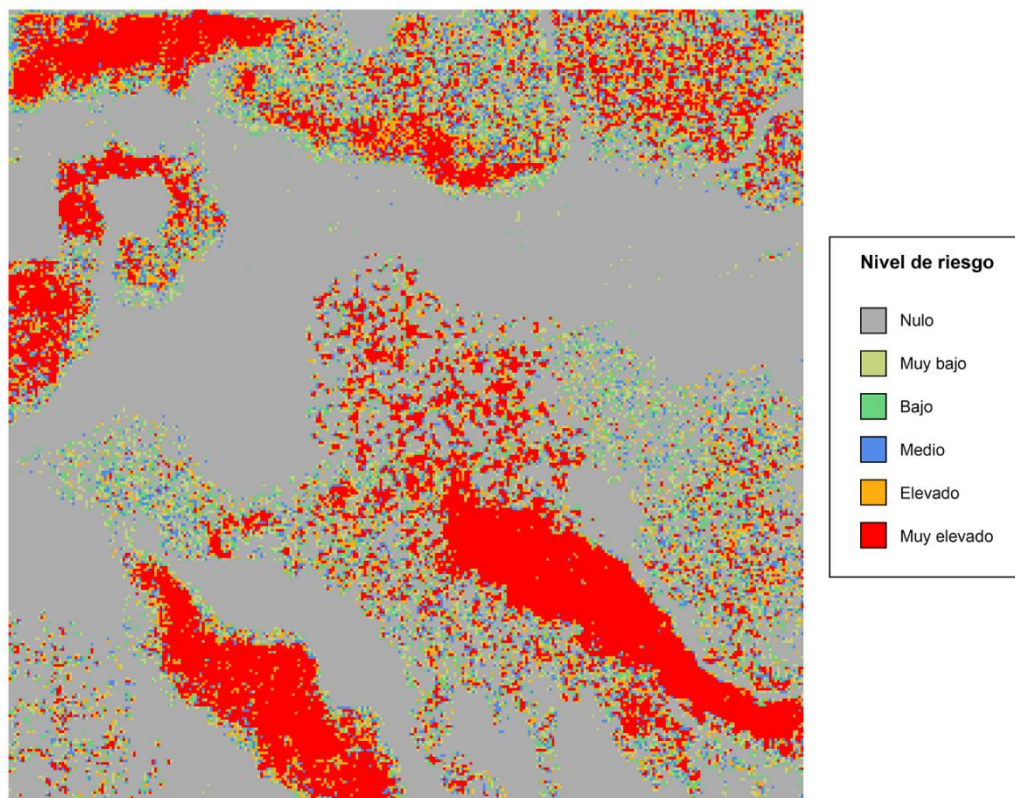


Figura 5-11: Mapa de riesgo por densidad de vegetación

De la misma manera que para la vegetación, se ha generado un mapa de riesgo en función de los rangos de inclinación (Figura 5-12) definidos previamente. Esta imagen es muy útil para identificar rápidamente regiones que suponen un alto riesgo para la propagación de un posible incendio, pero es necesario contrastar la información de la pendiente con la de la densidad de vegetación para obtener una mejor valoración del riesgo de cada zona del terreno.

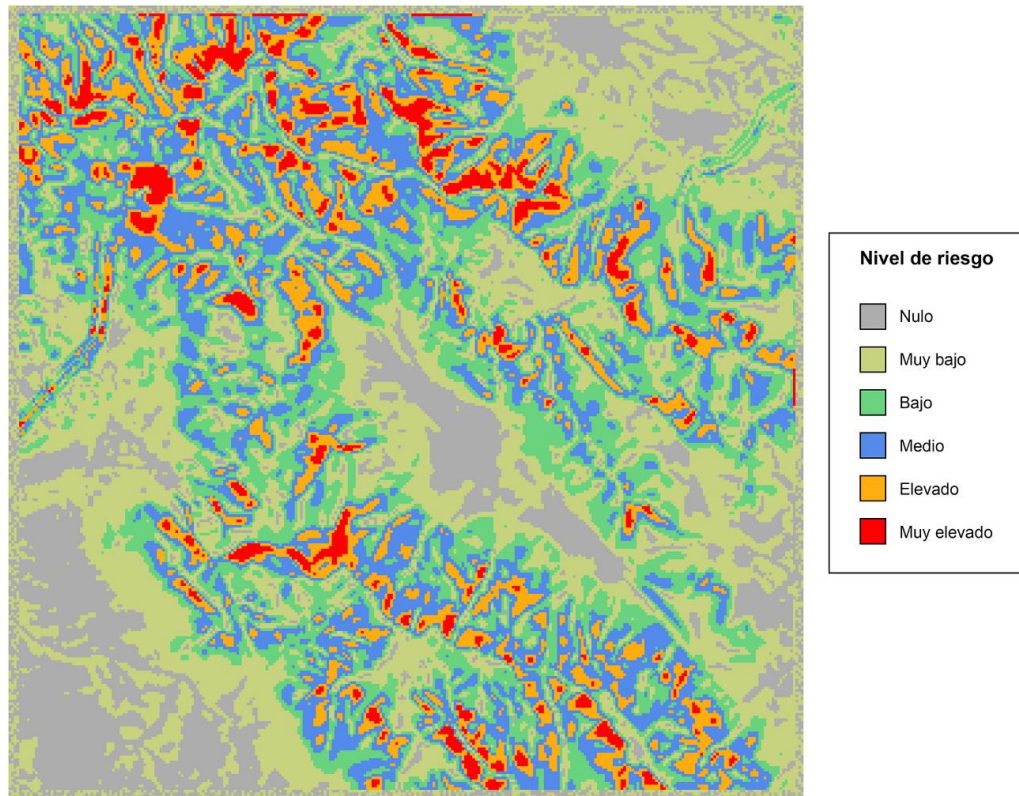


Figura 5-12: Mapa de riesgo por pendiente del terreno

Utilizando los dos factores de riesgo es posible generar una imagen final que represente el riesgo del terreno frente a un posible incendio. Siguiendo la fórmula para calcular el nivel de riesgo y la escala de riesgos definidas en la sección de desarrollo, se calcula y representa el riesgo de toda la superficie del terreno.

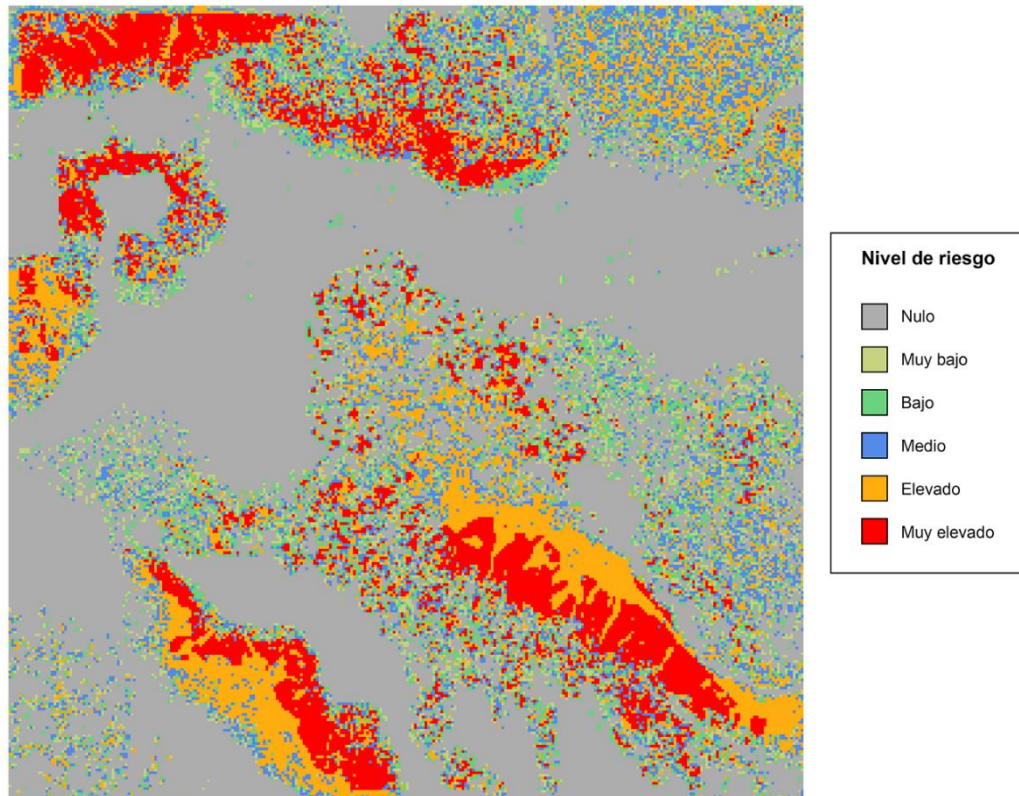


Figura 5-13: Mapa de riesgo ponderado

El mapa final de riesgo de la zona sobrevolada por los drones (Figura 5-13) indica el nivel de riesgo del terreno en función a la densidad de vegetación e inclinación de la superficie observada, permitiendo conocer rápidamente qué zonas requieren mayor atención o tomar acciones de reducción de riesgo con mayor antelación que otras. Comparando esta imagen con la vista aérea del terreno (Figura 5-3) se aprecia que las zonas con vegetación más compactada tienen valores de riesgo elevados o muy elevados, dependiendo de la inclinación de la zona. Además, zonas con vegetación más dispersa presentan distintos valores de riesgo que oscilan entre muy bajo y medio en su mayoría dependiendo también de la pendiente de cada punto del mapa.

En el caso de este terreno, existen varias zonas con una cantidad de superficie elevada que representan un riesgo elevado o muy elevado. En caso de incendio cercano a esos lugares o en esos mismos lugares, esas zonas arderían con mayor facilidad y velocidad, expandiendo el fuego en mayor medida y dificultando su extinción, además de causar más pérdidas. Por ello, sería necesario realizar modificaciones como introducir cortafuegos que seccionen estas zonas e impidan que el fuego se expanda por la totalidad del terreno de alto riesgo.

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

Este trabajo planteaba como objetivo la creación de un simulador de una zona rural forestal sobre la que poder desplegar un enjambre de drones, que siguiesen una ruta calculada para mapear el terreno mediante la toma y fusión de fotografías, obteniendo una imagen fiel del relieve del área sobrevolada. Se pretendía someter la imagen de la zona a un proceso de

tratamiento para distinguir las zonas de vegetación del resto de elementos del terreno y poder crear un mapa de riesgo de la zona en base a la cantidad de vegetación y pendiente del terreno.

Partiendo de estos objetivos, es posible extraer las siguientes conclusiones:

1. Se ha encontrado el entorno adecuado para la simulación en el motor de videojuegos Unity, que aporta las herramientas necesarias para realizar el grueso del trabajo necesario para el posterior cálculo y representación del riesgo (cálculo de rutas, cálculo de pendientes, movimiento de los drones, captura de imágenes, creación de una imagen compuesta y tratamiento de la imagen).
2. El terreno del entorno de simulación para la obtención de datos se ha creado de la manera adecuada, siendo este de un tamaño adecuado para la obtención de datos en tiempo adecuado con un enjambre de cuatro drones. La utilización del relieve de una región de la sierra de Guadarrama modificado para representar distintos accidentes geográficos aporta variedad y realismo al terreno útiles para asegurar que el tratamiento de la imagen es adecuado y descarta elementos no deseados.
3. La obtención de los puntos que debe cubrir cada dron es correcta y las rutas calculadas para recorrerlos permite cubrir el terreno en una cantidad de tiempo adecuada para que los drones puedan llegar a la zona de observación y regresar a un punto de partida remoto dentro del tiempo de autonomía de su batería.
4. El algoritmo de cálculo de altura de vuelo de los drones funciona adecuadamente y resulta en la obtención de imágenes que pueden ser fusionadas con una alta precisión que no entorpece la obtención de resultados veraces.
5. El proceso por etapas de tratamiento de la imagen descarta correctamente los elementos no considerados como vegetación que son visibles en la imagen compuesta formada por las fotografías de los drones. El descarte de colores que entorpecen el posterior proceso de clustering, seguido del pulido de la imagen para eliminar imperfecciones no descartadas por el método k-medias resulta en una imagen en blanco y negro en la que se distingue la vegetación del terreno de todo lo demás.
6. El cálculo de porcentaje de vegetación para zonas de tamaño fijo permite calcular el riesgo en caso de incendio para cada zona de acuerdo con la escala de riesgos definida y representarlo en un mapa de riesgo útil para la asistencia a los equipos de prevención de incendios, que pueden priorizar la atención a ciertas áreas del terreno sobre otras gracias a la estimación de riesgo por densidad de vegetación.
7. El mapa de riesgo por pendiente, calculado también para zonas del mismo tamaño fijo que para la vegetación, aporta de manera individual información rápida visual que destaca los puntos del mapa que podrían suponer un mayor peligro en caso de incendio, ya que la tasa de expansión del fuego crece exponencialmente junto con el aumento de la inclinación. Este mapa resulta útil para conocer zonas en las que, haya vegetación o no en el momento de la obtención de información de los drones, pueden ser peligrosas en caso de que en algún momento exista vegetación en esos puntos o en sus proximidades.
8. El cálculo del riesgo en función de la densidad de vegetación y la pendiente en aquellas zonas en las que la vegetación existe en el momento del mapeado del terreno proporciona la información necesaria para conocer qué zonas requieren actuar de forma temprana o deben ser patrulladas con mayor frecuencia ante la posibilidad de un incendio. La conjunción de ambos factores resulta en un mapa que destaca las zonas donde un fuego se expandirá con mayor velocidad dada la situación observada de vegetación, y por tanto establece qué zonas son consideradas más peligrosas.

6.2 Trabajo futuro

El simulador diseñado para este trabajo es el entorno ideal para la estimación de riesgo de incendios. En este simulador pueden incluirse otros factores de riesgo como la temperatura media habitual de una zona, la humedad en el ambiente, la velocidad y dirección del viento. Estos factores pueden ser determinantes en el origen y expansión de un incendio, por lo que podría crearse una simulación sobre el terreno de cada uno de estos elementos y aplicarlos a la estimación de riesgo final mediante mediciones tomadas o bien por los drones o bien por elementos de medición fijos en el terreno o, para terrenos reales, mediante herramientas externas que nos puedan aportar la información necesaria. Podrían incluso valorarse otros factores como zonas que hayan sufrido incendios, teniendo en cuenta su frecuencia y expansión, o la distancia a zonas habitadas, ya que en sus proximidades podría ser mayor la posibilidad de incendio.

Las escalas de riesgo establecidas en este trabajo son únicamente orientativas que resultan útiles para el terreno estudiado, pero estas podrían ser modificadas para obtener distintos mapas de riesgo a partir de la misma información si se desase. Esto puede ser interesante para ajustar los resultados a terrenos que puedan tener niveles de inclinación mucho menores o la distribución de la vegetación sea más uniforme. Este ajuste podría hacerse mediante la acción conjunta de bomberos e inteligencia artificial: con la experiencia de los primeros y un modelo de inteligencia artificial como una red neuronal es posible obtener una buena escala para la cuantificación de riesgos.

Además, sería posible implementar nuevos métodos de tratamiento de imágenes como la segmentación mediante un modelo entrenado, que permitiría crear mapas de riesgo de los tipos de vegetación para los que se entrene el modelo, si es que no interesa tener en cuenta todos los tipos de vegetación del terreno o se quiere un análisis cuantitativo que cuente el número de árboles o plantas por unidad de superficie para calcular los riesgos.

Sería interesante aplicar el proceso de tratamiento de imagen a fotografías del mismo terreno tomadas mediante un satélite para comprobar que el proceso de toma de imágenes y fusión es efectivamente correcto y no afecta al resultado final de asignación de riesgo.

Referencias

- Adeva, R. (11 de Febrero de 2021). *ADSLZone*. Recuperado el 6 de Junio de 2021, de <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>
- Anders, N., Valente, J., Masselink, R., & Keesstra, S. (2019). Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Drones*.
- Banu, T., Borlea, G., & Constantin, B. (28 de Noviembre de 2016). The Use of Drones in Forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 5.
- Bolyn, C., Adrien, M., Gaucher, P., Lejeune, P., & Bonnet, S. (1 de Enero de 2018). Forest mapping and species composition using supervised per pixel classification of sentinel-2 imagery. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 22.
- Garzón, M., Valente, J., Roldán, J. J., Cancar, L., Barrientos, A., & Del Cerro, J. (2016). A Multirobot System for Distributed Area Coverage and Signal Searching in Large Outdoor Scenarios. *Journal of Field Robotics*, 33.
- Generalitat Valenciana. (2012). *Manual de Buenas Prácticas en Prevención de Incendios Forestales*. Generalitat Valenciana. Conselleria de Governació. Recuperado el 7 de Mayo de 2021, de <https://agroambient.gva.es/documents/162905929/162908886/Manual+de+Buenas+Pr%C3%A1cticas+en+Prevenci%C3%B3n+de+Incendios+Forestales+-+English+%28383%2C2k%29/65f00043-102a-4835-a129-0b4bd364df79>
- Hojas-Gascon, L., Belward, A., Eva, H., Ceccherini, G., Hagolle, O., Garcia, J., & Cerutti, P. (2015). *Potential improvement for forest cover and forest degradation mapping with the forthcoming Sentinel-2 program* (Vols. XL-7/W3). (r. S. International Archives of Photogrammetry, Ed.) ISPRS.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2019). *Los Incendios Forestales en España. Decenio 2006-2015*. Gobierno de España, Madrid. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendios-decenio-2006-2015_tcm30-511095.pdf
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Los Incendios Forestales en España*. Gobierno de España. Obtenido de [3] Avance informativo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2020. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/avanceinformativoa31dediciembre2020_tcm30-132566.pdf
- Roldán-Gómez, J. J., González-Girona, E., & Barrientos, A. (2021). A Survey on Robotic Technologies for Forest Firefighting: Applying Drone Swarms to Improve Firefighters' Efficiency and Safety. *Applied Sciences*.
- The European Space Agency. (17 de Junio de 2015). *The European Space Agency*. Recuperado el 16 de Junio de 2021, de https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- Valente, J., Sanz, D., Del Cerro, J., Barrientos, A., & de Frutos, M. Á. (19 de Octubre de 2012). Near-optimal coverage trajectories for image mosaicking using a mini quadrotor over irregular-shaped fields.
- Valente, J., Sari, B., Kooistra, L., Kramer, H., & Múcher, S. (2020). Automated crop plant counting from very high-resolution aerial imagery. *Precision Agriculture*.
- Vélez Muñoz, R. (2009). *La Defensa Contra Incendios Forestales: Fundamentos y Experiencias*. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- WWF España. (s.f.). Recuperado el 5 de Mayo de 2021, de https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/bosques/incendios_forestales/

Zhang, C., Valente, J., Kooistra, L., Guo, L., & Wang, W. (2019). Opportunities of uavs in orchard management. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42.

Glosario

Unity	Motor de videojuegos
Asset	Recurso utilizado en Unity
Prefab	Recurso reutilizable ya creado en Unity
RGB	Modelo de color para la composición en función de los colores primaries de la luz
UTM	Universal Transverse Mercator, sistema de coordenadas